



HAL
open science

Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle

Alexis Souchet

► **To cite this version:**

Alexis Souchet. Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle. Sciences de l'information et de la communication. Université Paris 8, 2020. Français. NNT: . tel-02931264

HAL Id: tel-02931264

<https://hal.science/tel-02931264>

Submitted on 5 Sep 2020

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.



École doctorale N°224 - Cognition, Langage, Interaction (CLI)

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

Université Paris 8 Vincennes - Saint-Denis

Spécialité : Sciences de l'Information et de la Communication

présentée et soutenue publiquement par

Alexis SOUCHET

le **23 juin 2020** en visioconférence, France

Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle

Direction des travaux de thèse

Directrice de thèse : *Professeure* Ghislaine AZÉMARD

Co-directrice de thèse : *Docteure* Laure LEROY

Encadrante de thèse (entreprise) : *Docteure* Stéphanie PHILIPPE

Jury

Président : *Professeur* Bruno ARNALDI, INSA Renne, France

Rapporteur : *Directeur de Recherche* Jean-Marie BURKHARDT, IFSTTAR, France

Rapporteur : *Professeur* Philippe BONFILS, Université de Toulon, France

Examinatrice : *Maître de Conférence (HDR)* Domitile LOURDEAUX, UTC - CNRS, France

Examinatrice : *Professeure* Ghislaine AZÉMARD, Université Paris 8, France

Examinatrice : *Maître de Conférence* Laure LEROY, Université Paris 8, France

Examinatrice invitée : *Docteure* Stéphanie PHILLIPE, Manzalab, France

Financement *CIFRE N°2016/1571* délivré par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

Thèse réalisée dans l'entreprise **MANZALAB**, 108 rue Saint-Honoré 75001 PARIS, France

Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis

Laboratoire Paragraphe (EA349), Equipe EHN (Écritures et Hypermédiations Numériques)

2 rue de la Liberté 93526 SAINT-DENIS, France

À la mémoire de Jérémy, mon ami et frère de fait

RESUME

Une nouvelle génération de casques (HMDs) de Réalité Virtuelle (VR) a atteint le marché grand public et des entreprises. De nos jours, ils s'intègrent de plus en plus dans la formation professionnelle. Ces appareils affichent des images stéréoscopiques (S3D). L'exposition à ces images peut provoquer une fatigue visuelle. Parallèlement, le Serious Game (SG) tend à devenir un type de médiation des connaissances adopté bien que toujours questionné. Indépendamment et combinés (SG-VR), la VR et le SG demandent des preuves scientifiques supplémentaires de leur efficacité pour apprendre afin de motiver un usage raisonné sur la base d'un ratio bénéfices/risques. Les risques de fatigue visuelle sont à quantifier et documenter, notamment à la demande des autorités sanitaires.

Par une revue de la littérature, nous établissons que le SG, la VR, la combinaison SG-VR et la S3D sont globalement plus efficaces pour apprendre lorsque comparés à d'autres modalités et aux affichages bi-oculaires. Cependant, plus d'apports expérimentaux de meilleure qualité sont nécessaires. Deux expériences sont menées incluant 152 participants et testant 7 conditions expérimentales. L'expérience 1 montre que les HMDs de nouvelle génération causent une fatigue visuelle, celle-ci est plus élevée que devant un écran de PC. La fatigue visuelle en HMD a tendance à être plus élevée avec la S3D comparée à l'imagerie bi-oculaire. Cette différence n'est pas significative dans un environnement virtuel avec une disparité faible, peu de mouvements et pas de tâches nécessitant la discrimination de la profondeur. La fatigue visuelle n'a pas négativement impacté l'apprentissage. L'expérience 2 indique qu'afficher cycliquement de la S3D (passer de bi-oculaire à S3D) fatigue plus qu'afficher de la S3D sans interruption. Plus la stéréopsie est activée via des stimuli conflictuels, plus la fatigue est élevée. Nous opérons à une démonstration du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive sur la base de nos résultats expérimentaux et les preuves recueillies lors de l'état de l'art. Il apparaît que plus les erreurs (conflits sensori-moteurs) sont nombreuses et s'accumulent, plus le système visuel compense par des comportements associés à la fatigue visuelle. Cela lui permet de préserver la constance perceptuelle mais au prix d'une fatigue oculomotrice et possiblement cognitive.

Ces études nous ont permis d'établir que l'apprentissage avec la combinaison SG-VR est efficace dans le contexte expérimental testé mais la fatigue visuelle semble parfois l'influencer négativement. Afficher de la S3D n'est pas toujours nécessaire. Ces travaux ont également permis de qualifier les métriques et l'avantage futur à employer l'oculomètre pour mesurer la fatigue visuelle et la charge cognitive. Plus de travaux avec cet outil de mesure, pendant l'exposition à la VR, encore plus précis sont nécessaires afin de comprendre l'influence des conflits sensori-moteurs sur l'apprentissage : notamment les implications des liens entre fatigue visuelle et charge cognitive. Ces travaux sont d'autant plus prégnants que les HMDs semblent proches d'une large adoption pour l'apprentissage.

Mots clés : Réalité Virtuelle ; Serious Game ; Fatigue visuelle ; Apprentissage ; Stéréoscopie ; Charge Cognitive

REMERCIEMENTS

Peu d'accomplissements, extraordinaires ou non, peuvent se targuer de résulter d'un seul homme. Ce travail de thèse n'aurait su aboutir sans le concours de nombreuses personnes. Aussi, j'adresse mes remerciements :

A mes pairs, membres du jury ayant accepté d'examiner et sanctionner ce travail de thèse. Vos travaux me précèdent. La recherche est un effort collectif et vos nombreuses contributions sont la base des travaux de ce manuscrit.

À Laure Leroy, pour ton encadrement ainsi que l'exemple d'excellence scientifique, de persévérance et de courage que tu incarnes.

À Ghislaine Azémard, pour votre encadrement et les précédents travaux réalisés durant votre impressionnante carrière m'aillant permis cette thèse pluridisciplinaire.

À Stéphanie Philippe, pour ton encadrement et la rigueur autant que la justesse de tes conseils. Merci d'avoir été là et notamment dans les moments les plus difficiles.

À mes collègues et co-auteurs de Manzavision Floriane et Aurélien, vous avez travaillé activement à rendre possibles les expériences de cette thèse avec ingéniosité.

À mes collègues, Maurice, Hadjila, Marion, Julien, Grégory et Jean-Philippe. Votre aide, nos discussions et votre bonne humeur étaient ressourçant.

À Clément Merville, Président de Manzalab, Vincent Berlioz, Directeur Général de Manzalab et mes autres collègues. Vous m'avez donné l'opportunité de mener à bien cette thèse en me recrutant dans cette entreprise unique en son genre. Votre confiance et votre émulsion intellectuelle étaient une chance.

À David Ledoux, pour ton accueil dans les locaux de CréaTIC. Nos discussions, ton soutien lors de la première expérience de cette thèse ainsi que ton aide ont été précieuses.

À Dimitri Zobel, mon stagiaire durant la première expérience. Tu as su trouver ton autonomie lors de la réalisation de l'expérience en double aveugle. Merci pour ton travail.

Au Pr. Imad Saleh, pour votre relecture et vos conseils sur ces travaux.

Au Pr. Alain Berthoz. Durant mon Master, vous avez pris le temps de m'expliquer la méthode scientifique et de partager vos connaissances sur l'humain. Cela est d'habitude réservé à des amphithéâtres entiers.

À Jessy, sans ton amitié, cette thèse ne serait pas. Tu demeures un modèle autant qu'un ami.

À Vincent, Ulrich, Adrien, Laura, Sonia, Sabrina, Basile, Chloé et les autres. Pour votre amitié, votre aide et votre écoute sans lesquelles cette thèse n'aurait jamais pu aboutir.

A Maryse, ma mère, et Alain, mon père, tout de ce travail de doctorat cristallise les chances que vous m'avez offertes dans la vie. La grande liberté que vous m'avez conférée et l'amour du travail bien fait que vous m'avez inculqué m'ont guidé vers la recherche.

LISTE DES PUBLICATIONS

Actes de conférences internationales à comité de lecture

Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Floriane Ober, Aurélien Lévêque, and Laure Leroy. 2019. Investigating Cyclical Stereoscopy Effects over Visual Discomfort and Fatigue in Virtual Reality while Learning. In *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'19)*, Beijing, China. DOI: 10.1109/ISMAR.2019.00031

Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Dimitri Zobel, Floriane Ober, Aurélien Lévêque, and Laure Leroy. 2018. Eyestrain impacts on learning job interview with a serious game in virtual reality: a randomized double-blinded study. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '18)*, Tokyo, Japan. DOI: 10.1145/3281505.3281509

Actes de conférences nationales à comité de lecture

Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Floriane Ober, Aurélien Lévêque, and Laure Leroy. 2019. Jeu Sérieux en Réalité Virtuelle pour Apprendre l'Entretien d'Embauche : Expérience en Double Aveugle. In 3e Colloque International Game Evolution : Management et Pédagogie Ludique (CIGE 2019). Créteil, France.

Journaux internationaux à comité de lecture

[en cours de revue] Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Floriane Ober, Aurélien Lévêque, and Laure Leroy. 2020. Short and Long-Term Learning for Job Interview with a Serious Game in Virtual Reality: Influence of Eyestrain, Imaging and Apparatus. *Virtual Reality*.

[en cours de revue] Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Domitile Lourdeaux, and Laure Leroy. 2020. Visual Fatigue and Cognitive Load Links and Impacts on Measurements via Eye Tracking while Learning in Virtual Reality: a Review. *International Journal of Human-Computer Interaction*.

Journaux nationaux à comité de lecture

Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe and Laure Leroy. 2018. Efficacité d'apprentissage en Serious Game couplé à la Réalité Virtuelle : une revue. *Les Reflets de la VIIIème Convention pédagogique portant sur Les Pédagogies actives et renouvelées au service du projet global du Groupe IGS*. Cynthia EID (ed.). Vol.1.

Posters en conférences internationales à comité de lecture

Alexis D. Souchet, Tanguy Duval, Julien Letemple, Clément Saint-Jean, Stéphanie Philippe, and Vincent Lubrano. 2020. Neurostars: VR application to visualize and manipulate multiple sources of brain imaging. *2nd International Conference on Human Interaction & Emerging Technologies: Future Applications*. Paris, France.

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Remerciements	iii
Liste des Publications	v
Table des matières	vi
1 Introduction	9
1.1 Contexte des travaux	9
1.2 Cadre théorique et Problématiques.....	10
1.3 Méthodologie de recherche	12
1.4 Contributions vis-à-vis des SIC.....	13
1.4.1 Renouer avec la théorie cybernétique en SIC	13
1.4.2 Soutenir par la pratique la théorie de Bonfils.....	13
1.4.3 Documenter l'efficacité du jeu vidéo pour la médiation des connaissances	14
1.4.4 Rendre abordables les SIC avec la méthode expérimentale	14
1.4.5 Réaffirmer la valeur sociétale des contributions des SIC	15
1.5 Structure du manuscrit	15
2 État de l'art	17
2.1 Serious Game et Réalité Virtuelle	17
2.1.1 Introduction : SG et VR	17
2.1.2 Le Serious Game (SG)	20
2.1.3 La Réalité Virtuelle (VR) pour Apprendre.....	26
2.1.4 Combinaison SG et VR.....	37
2.1.5 Qualité d'Expérience (QoE).....	46
2.1.6 Conclusion : Serious Game et Réalité Virtuelle.....	51
2.2 Système Visuel Humain, VR et Stéréoscopie	52
2.2.1 Introduction : système visuel humain, VR et S3D	52
2.2.2 Sensations et perceptions humaines en environnement réel : l'œil en focus ...	53
2.2.3 Stimuler le système visuel humain en HMD.....	70
2.2.4 Conclusion : système visuel humain, VR et Stéréoscopie	77
2.3 La Fatigue Visuelle et sa Diminution.....	77
2.3.1 Introduction : fatigue visuelle et sa diminution.....	77
2.3.2 Effets secondaires de la Réalité Virtuelle	78
2.3.3 La Fatigue Visuelle	79
2.3.4 Mesurer la Fatigue Visuelle	84
2.3.5 Diminuer la Fatigue Visuelle	87
2.3.6 Conclusion : fatigue visuelle et sa diminution	92
2.4 Synthèse de l'état de l'art	92
2.5 Conclusions et apports nécessaires	93
3 Matériel et Méthodes	96
3.1 Introduction et contraintes.....	96
3.2 Revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage	97

3.2.1	Méthode de revue	97
3.2.2	Bases de données interrogées	97
3.2.3	Mots clefs recherchés	97
3.2.4	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	97
3.3	Mesure de l'Apprentissage.....	98
3.4	Mesure de la Fatigue Visuelle.....	98
3.5	Mesure de la Qualité d'Expérience	103
3.5.1	Présence.....	103
3.5.2	Flow.....	104
3.5.3	Inconfort visuel	104
3.6	Réduction de la Fatigue Visuelle	105
3.7	Serious Game en Réalité Virtuelle employé	105
3.7.1	Présentation de mon entretien d'embauche.....	105
3.7.2	Interactions et gameplay.....	106
3.7.3	Scénario et déroulé	106
3.8	HMD employé.....	111
3.9	Participants	112
3.9.1	Critères d'inclusion	112
3.9.2	Critères d'exclusion.....	112
3.9.3	Recrutement	112
3.10	Éthique	112
4	Résultats	113
4.1	Revue de la littérature : efficacité d'apprentissage en SG, VR, SG-VR et S3D ...	114
4.1.1	Efficacité d'apprentissage avec les SG	114
4.1.2	Efficacité d'apprentissage avec la VR	117
4.1.3	Efficacité d'apprentissage avec la Combinaison SG-VR.....	120
4.1.4	Efficacité d'apprentissage avec la S3D	124
4.1.5	Conclusions de la revue de la littérature	126
4.2	Expérience 1 : Fatigue visuelle et apprentissage selon le dispositif et l'imagerie .	127
4.2.1	Conditions expérimentales Exp1	128
4.2.2	Données collectées et analyses statistiques Exp1	136
4.2.3	Résultats Exp1	152
4.2.4	Conclusion Exp1	154
4.3	Expérience 2 : Stéréoscopie cyclique pour réduire la fatigue visuelle.....	155
4.3.1	Conditions expérimentales Exp2.....	155
4.3.2	Données collectées et analyses statistiques Exp2	160
4.3.3	Résultats Exp2.....	178
4.3.4	Conclusion Exp2	180
4.4	Liens entre fatigue visuelle et charge cognitive	181
4.4.1	Contexte	181
4.4.2	Anatomie et traitement (où ?).....	181
4.4.3	Traitement et comportement du système visuel (comment ?).....	182
4.4.4	Implications théoriques pour la Fatigue Visuelle et la Charge Cognitive.....	183
4.4.5	Vers une nouvelle définition de la Fatigue Visuelle	184

4.4.6	Implications pour l'apprentissage en SG-VR.....	184
4.4.7	Nos résultats au regard de ce lien fatigue visuelle – charge cognitive.....	185
4.4.8	Conclusion : lien fatigue visuelle / charge cognitive	185
5	Discussion.....	186
5.1	Limites des résultats obtenus.....	187
5.1.1	Conduite de la revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage	187
5.1.2	Mesurer la fatigue visuelle	188
5.1.3	Mesurer l'apprentissage	188
5.1.4	Mesurer la qualité d'expérience	189
5.1.5	Serious game employé	190
5.1.6	HMD employé.....	190
5.1.7	Randomisation, double aveugle, participants et éthique	191
5.2	Efficacité d'apprentissage via HMDs avec et sans stéréoscopie.....	191
5.3	Fatigue visuelle et sa réduction	193
5.4	Qualité d'expérience en HMD avec et sans stéréoscopie.....	196
5.5	Liens entre fatigue visuelle et charge cognitive	198
5.6	Travaux futurs	199
5.6.1	Fatigue visuelle en HMD	199
5.6.2	Apprentissage et Serious Games en réalité Virtuelle	200
5.6.3	Liens entre fatigue visuelle et charge cognitive	200
5.6.4	Ratio bénéfiques/risques pour l'adoption du numérique dans l'apprentissage	200
6	Conclusion et Perspectives.....	202
	Bibliographie.....	206
	Annexes	I
	Annexe 1 : Revue métriques oculomètre	I
	Annexe 2 : Lettre approbation CER Paris Descartes EXP1	II
	Annexe 3 : Lettre dépôt Expériences CNIL	III
	Annexe 4 : Lettre approbation CER Paris Descartes EXP2.....	IV
	Annexe 5 : Questionnaire de profil	V
	Annexe 6 : Résumé résultats statistiques EXP1	VI
	Annexe 7 : Résumé résultats statistiques EXP2.....	VII
	Annexe 8 : Résumé protocole EXP3	VIII
	Objectif du projet	VIII
	Type de données recueillies	VIII
	Environnement virtuel d'apprentissage.....	VIII
	Hypothèses générales	VIII
	Conditions expérimentales	VIII
	Matériel et outils utilisés	IX
	Déroulé de l'expérience	IX
	Participants et critères inclusion/exclusion	X
	Table des figures.....	A
	Table des tableaux.....	D

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DES TRAVAUX

L'utilisation du numérique à des fins d'apprentissage augmente mais est également largement critiqué (Spitzer, 2014). Son adoption ne repose pas toujours sur des preuves solides (Wolton, 2018). De la même manière, la défiance envers ces dispositifs n'est pas forcément fondée. Des travaux de recherche sont donc nécessaires pour mesurer les bénéfices et les risques liés aux usages de ces technologies numériques. Cela participera à l'utilisation **raisonnée** de ces dispositifs sur la base de preuves scientifiques. Cette thèse a été réalisée dans un cadre industriel : celui d'une Conventions Industrielles de Formation par la Recherche (CIFRE). Manzalab, l'entreprise partenaire, est spécialisée dans le Serious Game (SG) depuis 2010. Au début de ce travail de thèse, l'entreprise commençait à produire des contenus en Réalité Virtuelle (VR). Manzalab a compris très vite les enjeux de facteurs humains pouvant influencer l'adoption des casques de réalité virtuelle (HMDs) et l'efficacité d'apprentissage. L'Université Paris 8 a proposé la problématique précise de la fatigue visuelle en HMD. La thèse s'est donc construite dans la dynamique de mesurer l'efficacité d'apprentissage des dispositifs combinés SG-VR, la fatigue visuelle et l'impact de cette dernière sur la première.

En effet, depuis 2015, une nouvelle génération de casques de Réalité Virtuelle a atteint le marché grand public et des entreprises (K. C. C. Yang, 2019). De nos jours, ils s'intègrent de plus en plus dans l'éducation et la formation professionnelle (Bailenson *et al.*, 2008). Ces appareils affichent de l'imagerie stéréoscopique (S3D) (Banks, Allison, & Watt, 2012 ; Reichelt, Häussler, Fütterer, & Leister, 2010) dont l'exposition peut provoquer une fatigue visuelle (Bando, Iijima, & Yano, 2012 ; Y. Matsuura, 2019 ; Ukai & Howarth, 2008). Parallèlement, le Serious Game (SG) tend à devenir un type de médiation des connaissances adopté bien que toujours questionné (Azadegan, 2012 ; de Freitas & Liarokapis, 2011). Indépendamment et combinés, la VR et le SG demandent des preuves scientifiques supplémentaires de leur efficacité pour apprendre. La combinaison SG-VR impliquent des risques tels une fatigue visuelle. Ces risques sont à quantifier et documenter, notamment à la demande des autorités sanitaires (Anses, 2014). L'impact de tels risques sur l'efficacité d'apprentissage nécessite également des recherches. Or, la temporalité pour apporter ces connaissances semble correcte à un moment où les consommateurs ne semblent pas voir un intérêt fonctionnel aux HMDs (Herz & Rauschnabel, 2019).

Barfield résume la place de la VR dans l'agenda transhumaniste (Barfield, 2015). Selon lui, la VR va participer à l'émergence du Posthumain tel que désiré par les tenants du transhumanisme. Il y a donc un fort affect envers cette technique afin de penser l'organisation humaine autant que l'humain à travers la VR : créer une réalité « *améliorée* » (Chislenko, 2013) dans laquelle la distinction entre réel et virtuel n'est plus (Trothen, 2015). Le jeu vidéo, par extension le Serious Game, cristallise des affects similaires (Geraci, 2012). Dans cette vision de la VR, l'esprit humain pourrait y être téléchargé pour y vivre (Bostrom, 2003). Souhaiter cette place pour la VR dans la société, particulièrement en tant que dispositif d'apprentissage, implique une vision politique (Harley, 2019). Aussi, travailler sur des preuves expérimentales des risques et bénéfices permettrait de rationaliser ce rapport à la VR essentiellement de l'ordre de la

croyance. Ce rapport est parfois moteur de l'adoption de la VR, notamment dans le cadre de la formation, plutôt que basé sur des preuves scientifiques de bénéfices ou de risques.

Bonfils pointe que les environnements immersifs sont encore peu étudiés en Sciences de l'Information et de la Communication (SIC) (Bonfils, 2015). Ainsi, pour Bonfils, « *comprendre les relations entre le sujet et l'objet dans son couplage avec la technique, puis les modalités de son agir communicationnel [nécessite] une approche pragmatique.* » Dans ce contexte et compte tenu des enjeux à adresser, nous avons choisi d'adopter une démarche résolument pluridisciplinaire (Szostak, 2015). La direction et l'encadrement de cette thèse encourage cette pluridisciplinarité car les travaux menés par les directrices et l'encadrante sont : la biologie, l'informatique, la psychophysique et l'étude des médias. Devant l'état des connaissances sur ces questions de recherche, il a été choisi de se concentrer sur des apports expérimentaux. Nous employons surtout l'approche quantitative (Bernard & Joule, 2005).

1.2 CADRE THEORIQUE ET PROBLEMATIQUES

La Réalité Virtuelle, plus que tout autre média, tend à être « *transparente* » : l'utilisateur (dans notre cas l'apprenant) est invité à ne pas percevoir son interfaçage avec le dispositif (Nannipieri, Muratore, Dumas, & Renucci, 2014). Nannipieri qualifie cela de « *porosité* » entre homme et machine (Nannipieri, 2017). Comme rappelé par Renucci, « *l'individu connecté à la technique devient un être informationnel* » (Frank Renucci, 2015). Cela se retrouve d'autant plus avec un dispositif sociotechnique telle que la combinaison SG-VR car la continuité (le déroulé, le scénario) avec le dispositif est assurée par l'utilisateur et son interaction avec celui-ci. Cette interaction conditionne la réception des informations pour l'apprentissage. Ces processus participent à la convergence entre vivant et artificiel décrit par Renucci dont « *les frontières se brouillent* » (Frank Renucci, 2017). Aussi, les cadres théoriques auxquels nous nous référons sont les « *concepts fondamentaux des sciences humaines et sociales* » (Mucchielli, 1996) : les concepts employés dans notre recherche sont affiliés à la théorie de la Cybernétique (sciences cognitives, informatique et SIC) que Wiener définit comme « *science du contrôle et de la communication chez l'animal et la machine* » (Geoghegan & Peters, 2016 ; Segal, 2011 ; Wiener, 2019). Au regard de nos problématiques de recherche traitées sous forme d'hypothèses de travail, nous nous concentrons sur les phénomènes info-communicationnels entre l'humain et le dispositif SG-VR d'une part, entre le système visuel et le cerveau considérant la fatigue visuelle et l'apprentissage d'autre part. Nous posons 5 questions de recherche :

- La communication du savoir selon le dispositif (serious game sur PC ou HMD) est-elle efficace ?
- La communication du savoir selon le type d'image (bi-oculaire ou binoculaire) est-elle efficace ?
- Comment les yeux humains (des senseurs) sont impactés (fatigue visuelle) par le dispositif et donc comment l'information visuelle est traitée par le système visuel ?
- Comment la fatigue visuelle impacte l'apprentissage dans le dispositif SG-VR et donc comment la baisse de performance du système visuel humain impacte l'apprentissage ?

- Y a-t-il une interaction entre la gestion des conflits sensori-moteurs (conflit accommodation-vergence) du cerveau et les ressources de mémoire de travail (charge cognitive) ?

Nous accordons donc une forte place au principe de « *feedback* » issu de la cybernétique (Novikov, 2016). En effet, nous traitons des interactions entre l'humain et le dispositif puis les systèmes de perception et de cognition de l'humain, dans le cadre de l'apprentissage en SG-VR. Par notre objet de recherche, cette posture épistémologique (pluridisciplinaire) et l'emploi de la méthode expérimentale, nous renouons avec la dynamique qualifiée par Renucci et Pelissier de « *l'esprit d'aventure* » et de « *trésor des SIC* » à ces débuts (Frank Renucci & Pelissier, 2013). Notre but est d'apporter une base chiffrée pour participer à la discussion scientifique et sociétale concernant l'adoption ou non des SG et de la VR à des fins d'apprentissage en traitant certains risques et bénéfices (Shrader-Frechette, 2010). Donc, il s'agit d'obtenir des preuves robustes afin d'argumenter sur l'usage, ou non, des SG-VR pour apprendre sur la base d'un ratio bénéfices/risques (limité à risque de fatigue visuelle / bénéfice d'apprentissage). Cette démarche est surtout employée en médecine pour décider d'employer un traitement pour des patients ou le mettre sur le marché (Hughes *et al.*, 2016 ; Juhaeri & Dai, 2003 ; McAuslane, Leong, Liberti, & Walker, 2017 ; Pandey, Doyle, Bian, & Lis, 2010). Dans le cas de la technologie (Ciborra, 2007), l'évaluation bénéfices/risques est le plus souvent employée pour maîtriser les coûts d'implémentation. Nous nous concentrons sur les technologies mises en œuvre dans le dispositif SG-VR pour apprendre donc à travers un prisme de risques psychologiques (cognition, perception) et bénéfices sociaux (outil technologique efficace pour la communication de savoirs).

Bien qu'unifiée dans la théorie de la cybernétique, les domaines invoqués n'utilisent pas toujours les mêmes théories et les mêmes méthodes (B. Robinson *et al.*, 2016). Ainsi, la question de la valeur de preuve retenue se pose (Walton & Zhang, 2013). Cette problématique épistémologique et méthodologique nous est connue autant que les nombreux débats qu'elle provoque (Bryman, 1984 ; Onwuegbuzie & Leech, 2005). Ces débats se transposent à notre objet d'étude combinant souvent approches qualitatives, approches quantitatives et mesure subjectives et objectives (Tashakkori, Teddlie, & Johnson, 2015). Aussi, afin de prévenir des associations d'idées et de données impliquant des outils d'interprétations différents, nous explicitons systématiquement le corpus étudié, lorsque pertinent, et quelles méthodes furent utilisées afin d'appuyer cette information. Berthoz parle de fertilisation croisée entre neurosciences et info-com (Berthoz, 2018) dans son dialogue avec Gilles Rouet. Cette fertilisation nous apparaît utile pour les croisements listés plus avant. De plus, le manifeste pour le jeu vidéo européen, coordonné par Mata Haggis, argumente sur la nécessité de combiner les Sciences Humaines et Sociales (SHS) avec les « sciences exactes » afin d'apporter des connaissances sur le jeu vidéo (Haggis *et al.*, 2018). Le cadre proposé par Bonfils « *d'expérience communicationnelle immersive* » représente la base théorique SIC à nos apports (Bonfils, 2014). Bonfils la définit comme « *une expérience sensible et sensorielle, en équilibre et en tensions, vécue par un sujet actant à l'intersection de plusieurs espaces communicationnels : entre l'espace physique et l'espace numérique, entre l'espace des possibles et l'espace de l'action* (Bonfils, 2014). » À cet effet, la pluridisciplinarité de cette thèse s'ancre dans le premier point de la définition des digital humanities (Dacos, 2011) : « *le tournant numérique [...] modifie et interroge les conditions de production et de diffusion du savoir.* » Notre

travail se prévaut de l'orientation du manifeste des digital humanities consistant à « *participer à la définition et à la diffusion de bonnes pratiques, correspondant à des besoins disciplinaires et transdisciplinaires.* »

Nous défendons l'idée selon laquelle l'adoption rationnelle d'une technologie doit avant tout reposer sur l'établissement de risques et de bénéfices. Non pas sur une posture technophile ou technophobe (Nannipieri *et al.*, 2014). Ici, il s'agit de comprendre le rôle que peut jouer le serious game combiné à la réalité virtuelle dans l'apprentissage en étudiant une limite liée au dispositif : la fatigue visuelle. Produire des preuves expérimentales nous apparaît aussi nécessaire qu'un travail conceptuel autour de telles questions de recherche (Lanier *et al.*, 2019 ; Petri & Wangenheim, 2017). Nous identifions dans ce choix une réponse à Bonfils pointant la nécessité de pragmatisme dans l'étude de la VR (Bonfils, 2015). Par notre démarche, nous analysons l'usage (Le Coadic, 2006) du dispositif d'information et de communication du savoir qu'est la combinaison SG-VR.

1.3 METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le jeu vidéo et le serious game font partie des thématiques de recherche en SIC mais la VR n'apparaît qu'encore très rarement (Collectif, 2018). Aussi nous participons à amener les questions sur le dispositif sociotechnique qu'est la VR en SIC. Afin de répondre aux problématiques de recherche posées, nous employons la démarche expérimentale. La démarche expérimentale est présente en SIC notamment pour « *objectiver* » l'hypertexte (Koszowska-Nowakowska & Renucci, 2011) et l'intérêt de son emploi en SIC est défendu (Courbet, 2013) autant que critiqué notamment pour mesurer « *l'effet éducatif des média* » (Campion, Collard, & Fastrez, 2013). Notre démarche expérimentale est mixte (Tashakkori *et al.*, 2015) : quantitative et qualitative. Nannipieri et Muratore critiquent durement l'approche statistique afin de mesurer et appréhender les phénomènes questionnés en SIC (Nannipieri & Muratore, 2016) et nous considérons les limites pointées. Elles sont d'ailleurs pointées également hors des seules Sciences Humaines et Sociales (Nuzzo, 2014). Cependant, le contexte industriel de cette thèse autant que la démarche expérimentale nous motivent à employer les statistiques (Barker & Milivojevich, 2016) afin de répondre aux questions de recherches posées traduites sous forme d'hypothèses de travail. À cet effet, nous employons des démarches issues des facteurs humains (Stanton *et al.*, 2018). Nous nous attelons, par cette méthode, à une « *approche pragmatique* » appelée par (Bonfils, 2015). Nous nous efforçons par notre démarche et méthode de « *ne pas supprimer l'être humain comme sujet* » dans le questionnement des TIC telles que le SG-VR (Franck Renucci, Dumas, & Gaste, 2002). En effet, l'humain est le centre de notre démarche de recherche nous alignant sur la position du Pr. Robert J. Stone (pionnier des recherches en VR sur les facteurs humains) : « *human first, technology second* » (l'humain d'abord, la technologie ensuite) (Stone, 2016). Cette position nous motive ainsi à évaluer les risques (Döring & Feger, 2010) liés à la fatigue visuelle lors de l'usage du SG-VR pour apprendre en tant qu'outil afin d'aider à prendre la décision d'utiliser ou non ce dispositif.

1.4 CONTRIBUTIONS VIS-A-VIS DES SIC

1.4.1 Renouer avec la théorie cybernétique en SIC

Les enjeux industriels de cette CIFRE ont motivé à un positionnement théorique dans la cybernétique. La théorie cybernétique n'est plus le cadre le plus employé en SIC. Cependant, les problématiques que nous traitons nécessitent le recours aux sciences cognitives et à l'informatique dont, à notre connaissance, les SIC ne traitent pas directement concernant la VR et les SG. Nous avons donc choisi d'opérer à un croisement des états de l'art afin de transposer des connaissances issues de la psychologie expérimentale, de l'informatique et de l'ingénierie dans les SIC. Cela représente une dynamique assimilable à la Cybernétique en son temps consistant à rapprocher puis unifier théorie et pratique (Segal, 2011). Renouer avec cette dynamique héritée de la Cybernétique est une première contribution au regard des SIC car cela invite à plus mobiliser ce cadre théorique particulièrement car l'interfaçage entre l'humain et la machine provoqué par la VR motive à s'intéresser aux aspects d'ingénierie, d'informatique et psychologique lors de l'apprentissage avec ce dispositif.

1.4.2 Soutenir par la pratique la théorie de Bonfils sur les intrications communicationnelles de la VR et de l'humain apprenant

Puisque nos questions de recherche portent sur les usages (Le Coadic, 2006) de la combinaison SG-VR, nous nous sommes concentrés à contribuer au pendant pratique des contributions théoriques de Bonfils. Il s'agit de notre vision sur « l'*approche pragmatique* » que Bonfils identifie comme nécessaire (Bonfils, 2015). La mesure de l'apprentissage, la quantification de la fatigue visuelle, de différences selon les dispositifs et les types d'images représentent des contributions pratiques afin de questionner l'usage du dispositif sociotechnique qu'est le SG-VR. Au regard de l'approche théorique de Bonfils concernant la VR, nos travaux montrent que « l'*expérience communicationnelle immersive* » modifie les conditions de perception et de cognition de l'humain. En effet, l'apprentissage est plus efficace avec HMD que PC. Cependant, le HMD provoque une fatigue visuelle, tendanciellement plus haute avec la S3D, et cela influence négativement l'expérience communicationnelle immersive. Cette influence se caractérise par une communication des savoirs moins efficaces en lien avec la fatigue visuelle. La fatigue visuelle détériore la qualité d'expérience d'une part et apparaît augmenter la charge sur la mémoire de travail d'autre part. Donc, le récepteur (l'utilisateur) peut potentiellement recevoir l'information (les savoirs) moins efficacement lorsqu'il présente une fatigue visuelle. Ce travail de thèse invite donc les SIC à considérer la VR particulièrement comme modifiant les conditions psychologiques (perception et cognition) du récepteur. À cet égard, nous montrons que la fatigue visuelle en VR déséquilibre et augmente la tension des espaces communicationnels tels que définis par Bonfils dans son appréhension de la VR comme dispositif sociotechnique (Bonfils, 2014). L'intersection entre l'espace numérique (affichage S3D) et l'espace de l'action (mouvements oculomoteurs selon les stimuli visuels) provoque une fatigue visuelle affectant l'expérience sensorielle et sensible du sujet actant (l'apprenant via SG). Nous montrons donc par la pratique que la définition de la VR proposée par Bonfils est opérante. En effet, elle prédit que cette intersection des espaces communicationnels, dans notre cas entre le système visuel et les zones du cerveau gérant la mémoire de travail d'une part puis entre le dispositif SG-VR et l'efficacité d'apprentissage du sujet actant d'autre part, conditionne le traitement de l'information par l'humain et

donc la communication des savoirs pour les problématiques qui sont les nôtres. Notre seconde contribution au regard des SIC est donc d'avoir montré par la pratique que la théorie de Bonfils était effective pour prédire les intrications communicationnelles de la VR et de l'humain apprenant. Cela vient compléter les connaissances sur le SG déjà traitées en SIC mais surtout sur la VR, peu traitée en SIC (Collectif, 2018).

1.4.3 Documenter l'efficacité du jeu vidéo pour la médiation des connaissances
L'affect consistant à gamifier la société est prégnant au XXI^e siècle (Bonenfant & Genvo, 2014). Cependant, cette dynamique sociétale liée à l'adoption massive du jeu vidéo à des fins de divertissement transposée dans le cadre « sérieux » est à considérer notamment par rapport aux risques d'addiction et comportements violents. Nous avons participé à questionner cet affect par la documentation et la mesure de l'efficacité d'apprentissage via SG. Nous montrons que le jeu vidéo a des effets positifs sur la mémorisation de connaissances. Donc, le média qu'est le jeu vidéo est efficace pour la médiation des savoirs (à long terme : rétention) bien que débattu (Bean, Nielsen, Van Rooij, & Ferguson, 2017). Ainsi, nous participons à documenter les effets du jeu vidéo sur notre cerveau (Bavelier *et al.*, 2011). L'apprentissage via jeu vidéo commence à s'ancrer (H. Silva, 2015) et, d'après nos résultats, cela peut se justifier par une efficacité réelle. Donc, dans le cadre des digital humanities (Dacos, 2011), nous présentons des « conditions de production et de diffusion du savoir » via SG-VR. Ainsi, la troisième contribution de nos travaux au regard des SIC est d'indiquer l'efficacité du SG pour apprendre et la supériorité de la VR associée à ce média. Donc, nous présentons des preuves en faveur de l'efficacité de la communication des savoirs via le dispositif sociotechnique qu'est le SG-VR.

1.4.4 Rendre abordables les SIC avec la méthode expérimentale ainsi que les statistiques pour l'industrie et défendre une approche mixte (qualitative et quantitative)
Nous employons la méthode expérimentale rejetée par Champion *et al.* mais défendue par Courbet en SIC (Courbet, 2013 ; Champion, Collard, & Fastrez, 2013). Par ailleurs, Nannipieri et Muratore rejettent le recours aux statistiques en SIC (Nannipieri & Muratore, 2016). Pour les besoins de preuves à des fins industrielles, la mesure, donc la démarche expérimentale ainsi que les statistiques sont nécessaires dans notre travail. Cependant, selon nous, la vision très critique de la démarche expérimentale et des statistiques permet de ne pas réduire les observations des phénomènes info-communicationnels à des nombres. Or, dans notre cas, devant le manque de travaux en SIC sur la VR ainsi que l'opposition entre technophile et technophobe (Nannipieri *et al.*, 2014), l'approche expérimentale et statistique nous apparaît la plus pragmatique. Notre approche des problématiques de recherche est d'évaluer des bénéfices et des risques. Sur cette base chiffrée, nous arguons, qu'associée à l'environnement théorique de Bonfils, les créateurs de contenus et les utilisateurs sont à même de considérer certains bénéfices et risques du dispositif SG-VR. Les considérer uniquement sur une base axiomatique, selon nous, ne répond pas aux questions de recherche pour que les entreprises et les utilisateurs puissent s'approprier nos découvertes. Aussi, une quatrième contribution de cette thèse au regard des SIC est la preuve de l'utilité de la démarche expérimentale et des statistiques afin de rendre plus abordables les travaux de recherche d'une part aux industriels et d'autre part aux utilisateurs. Une cinquième contribution de cette thèse au regard des SIC est de défendre une approche mixte (qualitative et quantitative) rendue possible par la démarche expérimentale. Au contraire de « supprimer l'être

comme sujet » (Franck Renucci, Dumas, & Gaste, 2002) nous le faisons central en interrogeant son interfaçage au dispositif sociotechnique en nous prévalant de la position de Robert J. Stone [notre traduction] « *l'humain d'abord, la technologie ensuite* » (Stone, 2016). Ainsi, selon nous, les SIC pourraient avoir intérêt à employer la démarche expérimentale pour le poids de la valeur des preuves qu'elle permet notamment au regard des institutions régulant l'usage des technologies. Compte tenu des forts affects concernant l'intégration des technologies numériques dans l'apprentissage, cela autorise selon nous à favoriser le pragmatisme avec l'établissement chiffré de risques et de bénéfices. Or, la démarche expérimentale et les statistiques sont les méthodes consacrées à ces fins. De plus, la temporalité afin d'apporter ses preuves en plus des discussions théoriques sur le dispositif SG-VR est idéale car il apparaît que les changements pédagogiques dans l'éducation (PC, Tablettes etc) liés aux nouvelles technologies ne sont pas effectives pour le moment (Olmos, Cavalcanti, Soler, Contero, & Alcañiz, 2018).

1.4.5 Réaffirmer la valeur sociétale des contributions des SIC par leur essence interdisciplinaire

Enfin, notre démonstration théorique des liens entre fatigue visuelle et charge cognitive, permet de montrer que les SIC sont toujours en mesure de traiter des phénomènes info-communicationnels tels que questionné à l'époque de la Cybernétique. Au mieux de nos connaissances, ce sont des pans que les SIC occupent parfois à la frontière avec la psychologie cognitive, mais rarement. Ainsi notre sixième et dernière contribution au regard des SIC est de réaffirmer sa valeur scientifique au niveau sociétal autorisée par son essence interdisciplinaire. Les SIC nous ont permis de croiser des littératures habituellement isolées. Or, à l'heure où « *l'individu connecté à la technique devient un être informationnel* » (Frank Renucci, 2015), à l'heure où la « *porosité* » entre homme et machine (Nannipieri, 2017) va grandissante il nous apparaît utile de rappeler par le biais des SIC, que cet être informationnel est un humain interfacé à une machine et que cela comporte risques et bénéfices. Ainsi, nous posons une pierre aux demandes pour construire le rapprochement des sciences dites exactes et SHS demandées pour le jeu vidéo par Haggis *et al.* ainsi qu'entre neurosciences et info-com par Berthoz (Haggis *et al.*, 2018 ; Berthoz, 2018).

1.5 STRUCTURE DU MANUSCRIT

Cette thèse suit le format générique des articles scientifiques dit IMRaD : *Introduction, Material and methods, Results and Discussion* (Pontille, 2007). Nous présentons et analysons la littérature existante sur le serious game, la réalité virtuelle, le système visuel humain, l'imagerie stéréoscopique et la fatigue visuelle. Il en est dégagé des apports nécessaires afin de traiter nos questions de recherches. La conception et mise en œuvre des conditions expérimentales permettent de créer ces apports et de répondre aux questions de recherche. Après la spécification des matériels et méthodes retenus, nous restituons une revue de l'efficacité d'apprentissage avec le serious game, la réalité virtuelle, les deux combinés puis la stéréoscopie. Puis, nous procédons à la restitution de deux expériences incluant 152 participants cumulés. Ensuite, nous procédons à une démonstration des liens entre charge cognitive et fatigue visuelle. Enfin, ces résultats sont discutés en comparaison avec les précédentes études.

Ces travaux se concentrent sur les risques (fatigue visuelle, charge cognitive élevée) mais documentent également les bénéfices (efficacité d'apprentissage). En plus des enjeux scientifiques, le but est de permettre à l'industrie de mieux comprendre ces risques et y palier. Enfin, les autorités sanitaires pourront employer ces travaux afin de préconiser des conditions d'exposition aux SG-VR en stéréoscopie afin d'apprendre.

2 ÉTAT DE L'ART

2.1 SERIOUS GAME ET REALITE VIRTUELLE

2.1.1 Introduction : SG et VR

2.1.1.1 Méthodologie

Cette section d'état de l'art porte sur les serious games, la réalité virtuelle, leur combinaison et la qualité d'expérience. Il convient de définir, questionner ce que sont les dispositifs d'apprentissage incarnés par le serious game et la réalité virtuelle. Cela s'est organisé par l'établissement de 18 questions de recherche, regroupées en 4 thématiques.

Dans un premier temps, nous abordons le jeu vidéo : son implantation dans la société, les problèmes que cette implantation soulève et la dynamique de l'employer à des fins d'apprentissage. Il s'agit notamment d'apporter des éléments généraux pour décrire la dynamique concourant à leur adoption à des fins d'apprentissage. Dans un second temps, nous traitons du serious game : le concept, le marché, son efficacité sur l'apprentissage et les bonnes pratiques de conception identifiées par les pairs. Cela se traduit en 5 questions de recherche : voir Tableau 1.

Tableau 1 : Questions de recherche sur le jeu vidéo et les serious games

ID	Questions de Recherche
RQ1.1	Quelle place occupe le jeu vidéo dans la société ?
RQ1.2	Quels questionnements autour du jeu vidéo ?
RQ1.3	Quelles sont les motivations pour utiliser le jeu vidéo à des fins d'apprentissage ?
RQ1.4	Qu'est-ce que le serious game ?
RQ1.5	Quels facteurs influencent la qualité d'un serious game ?

Dans un second temps, nous examinons la réalité virtuelle en deux temps : premier temps une vue d'ensemble est proposée (le concept, la définition et le fonctionnement des visiocasques (HMDs), le marché, les problèmes soulevés par son usage), second temps son usage pour apprendre : le principe et les bonnes pratiques de conception identifiées par les pairs. Cela se traduit en 6 questions de recherche : voir Tableau 2.

Tableau 2 : Questions de recherche sur la réalité virtuelle et son usage pour apprendre

ID	Question de Recherche
RQ1.6	Qu'est-ce que la Réalité Virtuelle ?
RQ1.7	Que sont les Head-Mounted Displays (HMDs) ?
RQ1.8	Quels sont le fonctionnement et les caractéristiques des HMDs ?
RQ1.9	Quels sont le marché et les usages de la Réalité Virtuelle ?
RQ1.10	Comment la Réalité Virtuelle est employée pour apprendre ?
RQ1.11	Quels facteurs influencent la qualité d'un environnement virtuel d'apprentissage ?

Dans un troisième temps, nous étudions les serious games combinés à la réalité virtuelle : les théories de l'apprentissage adaptées à ce contexte et comment mesurer l'apprentissage avec cette combinaison. Cela se traduit en 2 questions de recherche : voir Tableau 3.

Tableau 3 : Questions de recherche sur la combinaison réalité virtuelle et serious game

ID	Question de Recherche
RQ1.12	Quelles sont les théories de l'apprentissage applicables pour la combinaison SG-VR ?
RQ1.13	Comment mesurer l'apprentissage en SG-VR ?

Dans un quatrième et dernier temps, nous considérons la qualité d'expérience des utilisateurs avec le serious game et la réalité virtuelle : le Flow et la Présence. Cela se traduit en 5 questions de recherche : voir Tableau 4.

Tableau 4 : Questions de recherche sur la combinaison réalité virtuelle et serious game

ID	Question de Recherche
RQ1.14	Qu'est-ce que la Qualité d'Expérience dans le contexte des SG-VR ?
RQ1.15	Qu'est-ce que la Présence ?
RQ1.16	Quels sont les résultats expérimentaux concernant l'impact de la Présence en VR ?
RQ1.17	Qu'est-ce que le Flow ?
RQ1.18	Quels sont les résultats expérimentaux concernant l'impact du Flow en SG ?

Les tableaux ci-dessus restituent l'ordre dans lequel les questions sont traitées par la suite.

2.1.1.2 Définitions et contexte

Nous évoquons mais excluons globalement la question de l'école et des enfants dans notre approche car l'objet de notre recherche porte sur les adultes et la formation.

Une segmentation (Roegiers, 2007) dans l'apprentissage est à acter entre :

- Éducation : apprendre dans le cadre d'une institution (école, université)
- Formation : apprendre en dehors du seul cadre de l'école, plutôt pour des connaissances métier ou liées à l'entreprise.

Cette segmentation repose le plus souvent sur une dichotomie école-université et entreprise ainsi qu'apprentissage des enfants et des adultes. Elle n'est pas systématique dans la littérature traitant d'apprentissage et particulièrement via réalité virtuelle ou serious game. De plus, éducation et formation sont parfois utilisées en synonymie dans la littérature scientifique.

Il n'y a pas de définition ni de théorie unifiée de l'apprentissage (De Houwer, Barnes-Holmes, & Moors, 2013). Dans les lignes de cette thèse, lorsque nous parlons d'apprendre, nous nous alignons sur la théorie cognitive en lien avec la théorie de la cybernétique (voir section 1.2). Nous nous positionnons plus particulièrement sur l'apprentissage avec des outils multimédia. C'est pourquoi nous employons la définition de l'apprentissage proposée par (Mayer, 2002) : « *processus conduisant à un changement, apparaissant en tant que résultat de l'expérience et augmente le potentiel d'améliorer les performances et les futurs apprentissages.* » La section

2.1.4.1 vient compléter et argumenter ce choix motivé par notre objet d'étude ainsi que les enjeux expérimentaux de notre travail. Dans le cognitivisme, l'apprenant est considéré comme un processeur d'informations et « *contrôle son apprentissage* » à travers « *un processus reliant les nouvelles informations à de précédentes apprises* » (Tennyson et Volk 2015, p. 711). Ainsi, Tennyson et Volk rappellent que selon le cognitivisme, il existerait un « *Système de Traitement de l'Information* » chez les animaux (humains et certains non-humains) dans lequel la mémoire est déterminante (mémoire court et long terme). Selon cette théorie, « *la connaissance est organisée en une association et interconnexion entre savoirs, croyances, attitudes et émotions.* »

Manzalab appréhende l'apprentissage à travers les 4 piliers de l'apprentissage proposés par Dehaene. L'usage de cette terminologie (4 piliers) est similaire à celle de l'UNESCO. Pour l'UNESCO, il s'agit de : learning to know, learning to do, learning to be et learning to live together. Une vision avec des dimensions fonctionnalistes mais surtout socio-politiques (Elfert, 2015), idéaux issus d'un rapport de 1996 conduit par le français Jacques Delors (Delors *et al.*, 1996). Selon les définitions proposées par l'UNESCO (« The four pillars of learning », n.d.), les quatre piliers de l'apprentissage de Dehaene sont compris dans le « learning to know. » La communication de ces principes a eu lieu, notamment, à travers un colloque tenu au Collège de France (Dehaene, 2012), sur un site web (Dehaene, 2013) et enfin un ouvrage (Dehaene, 2018). Selon Dehaene, ces « *quatre facteurs [...] déterminent la vitesse et la facilité d'apprentissage* » et constituent un « *algorithme d'apprentissage* » :

- 1) **L'attention.** Il s'agit d'un mécanisme servant à sélectionner l'information et à moduler son traitement (R. J. Sternberg & Sternberg, 2016). Trois « réseaux » d'attention sont identifiés en neurosciences : alerte, orientation et contrôle exécutif (Rueda *et al.*, 2015). L'attention permet de gérer l'espace de mémoire limité du cerveau (Chun & Turk-Browne, 2007).
- 2) **L'engagement actif.** L'engagement actif correspond à la capacité du dispositif à conserver l'attention en sollicitant l'apprenant.
- 3) **Le retour d'information.** La méta-analyse de Van der Kleij *et al.* indique que dans des dispositifs d'apprentissage par ordinateur, plus le retour (feedback) est immédiat, plus cela est efficace et ce surtout pour des apprentissages courts (Van der Kleij, Feskens, & Eggen, 2015).
- 4) **La consolidation.** La consolidation consiste à répéter l'apprentissage pour mieux l'ancrer chez l'apprenant, 1 heure de contenu sera mieux retenue lorsque découpée en 4 sessions de 15 minutes par jour plutôt que tout d'un coup. Cela est connu dans la littérature comme l'apprentissage distribué (Gerbier & Toppino, 2015).

Dans cette approche de Dehaene, le sommeil est pointé dans son rôle d'ordonnement des connaissances et l'inscription en mémoire long terme (Chambers, 2017 ; de Bruin, van Run, Staaks, & Meijer, 2017).

Ces principes fondamentaux sont employés par Manzalab dans leur conception de serious games, notamment celui employé à des fins expérimentales dans nos travaux (voir sections 2.1.4.1 & 3.7).

2.1.2 Le Serious Game (SG)

2.1.2.1 Du jeu vidéo au serious game

2.1.2.1.1 Le jeu vidéo : aperçu d'un média et d'une industrie

Après plusieurs tentatives de développement de jeux d'échecs et de jeux de dames, le premier jeu vidéo est né dans un laboratoire de Cambridge : *Noughts and Crosses*, conçu en 1952 par A.S. Douglas sur l'EDSAC (Egenfeldt-Nielsen, Smith, & Tosca, 2016). Ce jeu n'est malheureusement pas sorti du laboratoire et a été détruit après utilisation. Entre ces premiers pas d'universitaires et nos jours, nombreuses furent les avancées et les moments marquant du jeu vidéo. Dans leur ouvrage, Egenfeldt-Nielsen *et al.* proposent un historique du jeu vidéo, son environnement, résumant des points clefs. Un autre historique est proposé par The Strong National Museum of Play® (« Video Game History Timeline », n.d.). Nous proposons de restituer des chiffres récents afin d'offrir une vue de marché et de consommation, agrémentée d'apports universitaires sur les principaux usages.

Selon Statista, le jeu vidéo représente un chiffre d'affaire monde de 151.9 milliards de dollars en 2019 soit un doublement en 7 ans (à 70.6 en 2012) et une projection de 180.1 milliards de dollars en 2021 (Gough, 2019a). Les joueurs sont massivement en Chine, aux USA et au Japon (« 2019 Video Game Industry Statistics, Trends & Data », 2019). En Europe, les trois premiers pays consommateurs sont l'Angleterre, l'Allemagne et la France (Burger, Freiland, Piechotta, Schander, & Yntema, 2018). Selon Newzoo, 2.2 milliards de joueurs sont actifs sur la planète en 2017 (McDonald, 2017). Selon Earnest, en 2018, les 18-24 ans sont la frange de la population jouant le plus et décroît avec un âge avançant (Morris, 2018). Les personnes avec un Bac ou équivalent sont plus susceptibles d'acheter et jouer aux jeux vidéo. Selon Newzoo, en 2017, 46 % des joueurs sont des femmes (Osborn, 2017), la population de joueurs est donc plus souvent masculine (Romrell, 2014). Les principaux appareils sur lesquels sont distribués les jeux vidéo sont : les consoles dédiées aux jeux vidéo (Sony, Nintendo et Microsoft), les PC et les Smartphones. Le smartphone vient se substituer aux consoles pour le jeu occasionnel (Yamaguchi, Iyanaga, Sakaguchi, & Tanaka, 2017) et devient le terminal de jeu principal pour 51 % des joueurs (McDonald, 2017).

La distribution des jeux a longtemps été tributaire de supports physiques (cassettes, CD) mais a été massivement numérisée au début des années 2000 (Marchand & Hennig-Thurau, 2013). Les deux avantages majeurs pour l'utilisateur : pas de perte, pas de destruction possible du jeu. On peut distinguer les plateformes d'achat sur internet de jeux sur console et sur PC (e.g. Steam), et les stores pour les applications mobiles. Les jeux mobiles les plus distribués sont des *Free To Play* (gratuit pour jouer mais des achats en jeu sont possibles et peuvent conditionner l'avancée). Le plus emblématique est *Candy Crush* (associer au moins 3 bonbons pour les écraser) développé par King (Amaro, Veloso, & Oliveira, 2016).

Avec des connexions internet plus efficaces, le début des années 2000 a vu l'avènement de jeux en ligne (Jin, 2015). Le plus emblématique est *World of Warcraft* (jeu de rôle en ligne massivement multijoueur : MMORPG) développé par Blizzard. Mais, en 2019, celui avec le plus d'actifs est *League of Legends* (arène de bataille en ligne : MOBA) développé par Riot Games (Snider, 2019). L'eSport se démocratise (Scholz, 2019) (compétitions de jeux vidéo suivies par

un public) et grandit (K. Tran, 2018) : passé de 281 millions de spectateurs en 2016 à 422 en 2019 et représenterait 600 millions en 2023. Selon Statista, il s'agit d'un chiffre d'affaire monde de 1096 millions de dollars et une projection de 1.79 milliards en 2022 (Gough, 2019b).

Certains jeux vidéo sont devenus des franchises et se développent de plus en plus de manière crossmédia (Picard, 2008) et transmédia (Thon, 2009). Citons, par exemple, les jeux AAA (jeux de haute qualité avec un budget élevé) tel qu'*Assassin's Creed* d'Ubisoft ou le MMORPG *World of Warcraft* de Blizzard : ces deux franchises ont en commun d'avoir étendu leur univers narratif en films. Les produits dérivés (figurines, livres) sont de plus en plus courants.

Nous avons succinctement présenté les origines du jeu vidéo en pointant des historiques dans la littérature. Puis, nous avons restitué des chiffres sur l'état du marché. Enfin, nous avons montré la tendance des univers narratifs des jeux vidéo AAA à s'étendre dans une logique crossmédia ou transmédia. La prochaine section traite des problèmes psychologiques et sociétaux soulevés par le jeu vidéo.

2.1.2.1.2 Le jeu vidéo : problèmes soulevés

Le jeu vidéo souffre d'une image parfois négative liée aux questions de violence (jeux vidéo violents motivant les comportements violents) (Calvert *et al.*, 2017) et d'addiction (e.g. les jeux en ligne) (Van Rooij, Schoenmakers, Vermulst, & Van De Mheen, 2010). Les comportements violents semblent pouvoir être corrélés à la pratique de jeux vidéo violents (C. A. Anderson, 2004 ; Wrzesien *et al.*, 2014). Pourtant, le phénomène de « désensibilisation », incarnant la principale critique à leurs encontre, est parfois questionné (Szycik, Mohammadi, Münte, & Wildt, 2017) tout comme le possible manque d'empathie (Gao *et al.*, 2017).

L'addiction est un autre phénomène pointé quant à l'usage des jeux vidéo. La notion même d'« addiction au jeu vidéo » peut être questionnée (R. T. A. Wood, 2007). Elle pourrait être liée à des problèmes de santé (psychologique) autres et sous-jacents (Ferguson, Coulson, & Barnett, 2011). En 2013, l'Association Américaine de Psychologie (APA) ajoute dans son *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (DSM-5) l'addiction aux jeux vidéo en ligne (American Psychiatric Association, 2013). En 2018, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ajoute l'addiction aux jeux vidéo dans sa 11^e édition de *Classification Internationale des Maladies* (ICD) sous la codification 6C51 (World Health Organization, 2018). Ces ajouts aux manuels de référence officiels sont contestés par une partie de la communauté scientifique et par l'industrie du jeu vidéo. Les détracteurs pointent le manque de preuve et des critères symptomatiques flous (Groves *et al.*, 2015). Ce sont des sujets très discutés et débattus pour lesquels plus d'études sont systématiquement demandées (Bean, Nielsen, Van Rooij, & Ferguson, 2017).

Dans le cadre de notre recherche, compte tenu de notre sujet, il ne nous apparaît pas que ces risques, possibles, sont particulièrement à considérer. Toutefois, il peut être utile de se questionner sur l'inclusion du jeu vidéo à des fins d'apprentissage car impliquant de s'exposer plus encore à ces risques (i.e. participer à faire d'une personne un joueur excessif). Les effets positifs ou négatifs du jeu vidéo, sur notre cerveau par exemple (Bavelier *et al.*, 2011), sont à l'étude. Le consensus, en dehors du jeu excessif lors du développement de l'enfant, n'est pas encore établi malgré le statut de l'APA et de l'OMS.

Une approche critique du jeu vidéo montre qu'il est le réceptacle d'affects et de croyances liées à l'humain via le transhumanisme (Geraci, 2012). En généralisant cette tendance, il est question du rapport de l'humain au numérique (Beckouche, 2017) ainsi qu'aux technologies (Aguiar, 2018) : leur valeur prétendument salvatrice (Calheiros, 2015). Le jeu vidéo porte la croyance d'un réenchantement du monde (Siegel, 2015). Il est devenu une composante de la culture de la société contemporaine (M. Daniel & Garry, 2018). Le jeu vidéo en tant qu'élément culturel (Shaw, 2010) et notamment pour apprendre semble être devenu « socialement acceptable » en tant que technologie émergente (Koelle *et al.*, 2018). Cette influence sur la culture s'étend aux supports de transmission du savoir : gamifier l'apprentissage est connoté positivement (Siegel, 2014). Selon Crevoisier, une approche philosophique du jeu vidéo sur les transformations de l'image peut se reposer sur les concepts établis par Deleuze sur le cinéma (Crevoisier, 2019). Ces croyances et affects invitent à tirer parti du meilleur du jeu vidéo. Pourtant, celui-ci participe à créer ce que l'auteur de Science-Fiction Alain Damasio, se reportant souvent à Foucault et Deleuze, appelle le « technococon » (Damasio, 2019). Un cocon composé des technologies nous entourant, devenant de plus en plus épais, avec la promesse de nous permettre de muer en un humain augmenté mais dans lequel nous nous renfermons pour ne jamais muer. L'influence du jeu vidéo sur le rapport de l'humain à lui-même et ses artefacts se caractérise par une volonté de gamifier la société (Bonenfant & Genvo, 2014). L'apprentissage (H. Silva, 2015) et le travail en entreprise (Ravelli, 2018) ne font pas exception. Il y a donc un fort élan sociétal à inclure la gamification à de plus en plus de nos artefacts. Sous cette impulsion, les artefacts utiles à l'apprentissage sont particulièrement visés pour compléter ou remplacer l'existant (livres par exemples). C'est ainsi que le jeu vidéo est présenté comme une technologie efficace pour apprendre, mais rarement en rappelant le consensus scientifique à ce sujet. Donc, il y a une forte dynamique à employer le jeu vidéo à des fins d'apprentissage sans que celle-ci repose sur des preuves scientifiques et plutôt sur une croyance en des technologies. C'est l'un des biais conduisant à l'emploi de serious games bien que de réelles preuves soutiennent l'efficacité d'apprentissage avec de tels outils.

Nous avons évoqué les origines du jeu vidéo. Ensuite, nous avons décrit le marché du jeu vidéo à travers des indicateurs clefs en rapportant des études d'instituts spécialisés. Nous avons spécifié une tendance des jeux vidéo à étendre leur univers narratif à d'autres médias. Enfin, nous avons traité de trois risques souvent discutés sur le jeu vidéo : la violence, l'addiction, la dynamique de gamification de la société, particulièrement souhaitée dans l'idéologie transhumaniste, sous un angle critique. La prochaine section traite de l'intégration du jeu vidéo comme medium d'apprentissage.

2.1.2.1.3 Le jeu vidéo pour apprendre : vers le serious game

La massification du jeu vidéo en tant que média, ses influences dans la société a conduit à son introduction dans l'éducation et l'apprentissage (Shaffer, Squire, Halverson, & Gee, 2005). Il y a, à cet égard, un travail actif des créateurs de jeux vidéo afin de s'assurer de son utilisation dans le cadre de l'apprentissage (Fichez, 2001). La gamification de l'apprentissage est en cours et étudiée mais manque encore de preuves expérimentales reposant sur des designs robustes, dans des contextes variés et d'analyses théoriques (Nacke & Deterding, 2017). En 2015, le statut de l'APA était que plus de recherches et preuves étaient nécessaires (Novotney, 2015).

Malgré tout, l'introduction du jeu vidéo à des fins d'apprentissage répond à plusieurs enjeux :

- **Mobiliser un média largement adopté** dans une frange importante de la population puis réduire la fracture entre usages du quotidien au XXI^e siècle (K. D. Squire, 2003) et usages lors de l'apprentissage (Tang, Hanneghan, & Rhalibi, 2009)
- **Ajouter un média dans une logique de multimodalité** (Lutkewitte, 2013)
- **Assurer l'engagement et la motivation** (Dörner, Göbel, Effelsberg, & Wiemeyer, 2016) des apprenants dans le parcours d'apprentissage en mobilisant des outils pédagogiques plus attractifs : par exemple avec une dimension fun (Malone, 1980 ; Martens & Müller, 2015)
- **Utiliser un média avec des feedbacks directs** (Van der Kleij *et al.*, 2015) : cela fait écho aux quatre piliers de l'apprentissage (Dehaene, 2018)
- **Améliorer la rétention des connaissances**, bien que des preuves empiriques restent nécessaires comme identifié depuis plusieurs années (K. A. Wilson *et al.*, 2009)

La gamification de l'apprentissage se heurte à des problématiques de création des instructions (Martens & Müller, 2015). Les effets sur la cognition du jeu vidéo pour apprendre commencent seulement à être étudiés (Van Eck, 2010). Les problématiques soulevées par l'utilisation du jeu pour apprendre (Michael & Chen, 2005) connaissent un traitement accru par la communauté scientifiques ces dernières années (Martí-Parreño, Méndez-Ibáñez, & Alonso-Arroyo, 2016). Il y a par exemple : des recommandations de design (Erenli, 2012 ; Garris, Ahlers, & Driskell, 2002 ; Symborski *et al.*, 2016), l'adoption par les enseignants (Ketelhut & Schifter, 2011), la terminologie (Chollet, 2019 ; Dörner *et al.*, 2016) ou l'agenda pour implémenter le jeu vidéo (Ma, Williams, Prejean, & Richard, 2007).

La gamification s'étend à l'éducation avec des effets positifs rapportés (Dreimane, 2019 ; Yıldırım & Şen, 2019). Les serious games sont développés dans un but d'apprentissage par le jeu depuis les années 70 malgré le phénomène présenté et questionné comme nouveau ou émergent (Laamarti, Eid, & Saddik, 2014). La gamification et l'usage du serious game s'est étendu à des enjeux autres que le seul apprentissage (Baptista & Oliveira, 2019). L'usage du serious game s'installe dans l'entreprise (Martin, 2018).

2.1.2.1.4 Synthèse : du jeu vidéo au serious game

En synthèse, il apparaît que la place qu'occupe de nos jours le jeu vidéo dans la culture et son économie est prégnante. Le marché est grandissant. De plus, les formes de narrations et les médias dérivés des univers créés sont de plus en plus variées. En moins de 70 ans, le jeu vidéo initialement créé et abrité par les laboratoires de recherche s'est largement diffusé auprès du grand public. Cela résulte en une volonté de gamifier la société. L'apprentissage se retrouve également dans cette dynamique : à cet effet, le jeu vidéo est de plus en plus considéré comme média à employer. L'utilisation ou la création de jeux vidéo pour apprendre posent nombre de problématiques scientifiques. Celles-ci se concentrent autour d'un concept : le serious game.

2.1.2.2 Entre serious game, jeu pour apprendre et simulation

2.1.2.2.1 Serious game : vue d'ensemble

Dès 1948, l'armée américaine a commencé à développer des simulations gamifiées (R. Smith, 2009). La première utilisation du terme « serious game » est communément imputée à Abt en 1970 (Abt, 1970). Toutefois, il semblerait que les premiers jeux vidéo des années 1950 pouvaient déjà être considérés comme des serious games puisque leur finalité n'était pas le seul divertissement (Djaouti, Alvarez, Jessel, & Rampnoux, 2011b). Djaouti *et al.* pointent néanmoins 2002 comme le début d'une création plus importante de ces types de contenus. Dörner *et al.* reprennent les mêmes étapes historiques (Dörner *et al.*, 2016).

Le serious game ne possède pas une définition faisant consensus (Dörner *et al.*, 2016). Il est considéré comme un nom valise dont chacun propose une définition afin de délimiter ses propres enjeux (Allal-Cherif & Makhoulf, 2015) liés à son propre domaine (Marsh, 2011). Deux définitions sont souvent adoptées : celle de Zyda (Zyda, 2005) et celle de Michael & Chen (Michael & Chen, 2005). Toutefois, dans le cadre de notre recherche, nous nous alignons sur la définition de Djaouti *et al.* : « *tout logiciel fusionnant un but non divertissant (sérieux) avec une structure de jeu vidéo (jeu)* » (Djaouti, Alvarez, & Jessel, 2011a).

Cette définition est plus incluante comparée aux précédentes. Par ailleurs, elle réaffirme l'aspect « game » souvent mis à part pour se démarquer du divertissement et de l'edutainment. Le mot serious game reste souvent utilisé en synonymie avec simulation ou jeu vidéo pour apprendre (Lamb, Annetta, Firestone, & Etopio, 2018). Egenfeldt-Nielsen identifie deux pôles dans le jeu vidéo pour apprendre, les serious games, ou l'edutainment (Egenfeldt-Nielsen, 2006) : apprendre ou jouer. Il s'agit, selon lui, de trouver un équilibre entre les deux. L'edutainment consiste en un jeu (vidéo dans notre cas) permettant à l'apprenant d'en tirer des connaissances tout en se divertissant (Charsky, 2010). L'edutainment s'est révélé inefficace par rapport à d'autres approches car les apprenants se divertissaient plus qu'ils n'apprenaient. La dynamique du serious game est de partir de la nécessité d'apprendre tout en utilisant certains leviers du divertissement (de Freitas & Liarokapis, 2011). Il y a une dynamique plus réaliste avec le serious game. L'écriture de serious games emprunte ainsi au documentaire dans sa volonté de restituer le réel, comme établi par l'analyse transmédiatique d'Allain (Allain, 2013). Les pratiques des vingt dernières années ont mené vers des propositions de méthodes de conception démontrant une certaine maturité de ce type de médiation du savoir (de Lope, Arcos, Medina-Medina, Paderewski, & Gutiérrez-Vela, 2017).

La classification des serious games rencontre des difficultés. Il s'agit d'une problématique déterminante pour structurer les apports et permettre d'adopter un vocabulaire commun. Plusieurs taxonomies ont ainsi été proposées. Celle de Prieto de Lope et Medina a retenu notre attention : la *Comprehensive Serious Game (CSG) Taxonomy* (De Lope & Medina, 2016). Elle repose sur six caractéristiques regroupant seize critères. Nous nous reporterons à cette taxonomie afin de caractériser le serious games que nous mobiliserons dans notre approche expérimentale. Ceci afin de participer à l'établissement d'une classification commune. Nous employons cette taxonomie car 1) elle est la plus à jour à l'amorce de cette thèse, 2) elle n'exclue pas les simulations dans une dynamique d'asseoir la distinction entre différents médias, 3) elle est la première classification

incluant plusieurs usages auparavant exclus : ceux voulant utiliser les serious games, ceux voulant en créer et 4) elle a été fondée particulièrement pour les créateurs de serious games 5) elle ne concentre pas sur un seul domaine d'apprentissage. Dans cette taxonomie, la simulation est un sous-genre du serious game, en accord avec les travaux de Tobias *et al.* mais contre ceux de Young *et al.* (Tobias & Fletcher, 2012). Selon Young *et al.* les simulations ont une volonté de réalisme que les serious games n'ont pas (M. F. Young, Slota, & Lai, 2012a). Bien qu'initialement développé à des fins de formation, le serious game est aujourd'hui également étudié pour son intégration dans l'éducation (De Gloria, Bellotti, & Berta, 2014). Selon Raybourn, le serious game s'inclut dans un paradigme d'apprentissage transmédia dans lequel les modalités et les éléments narratifs variés mobilisent efficacement les apprenants (Raybourn, 2014).

Les serious games sont employés dans des domaines aussi variés que la formation du personnel soignant, des patients, des entrepreneurs, des étudiants en langues, des élèves de primaire à lycée (Almeida & Simões, 2019 ; M.-H. Chen, Tseng, & Hsiao, 2018 ; Ijaz, Khan, Ali, Qadir, & Boulos, 2019 ; Loahavilai, Chakpitak, Sureephong, & Dahal, 2015 ; Mason & Loader, 2019 ; Pallavicini, Ferrari, & Mantovani, 2018). Nous avons défini la notion de serious game et nous sommes alignés sur Djaouti *et al.*. La taxonomie de Lope *et al.* a été introduite afin de reporter nos travaux à une classification efficace. Nous avons vu que le serious game est utilisé dans le cadre de l'éducation et de la formation. La prochaine section traite des facteurs afin de créer des serious games efficaces.

2.1.2.2.2 Quels facteurs pour créer un serious game efficace pour apprendre

Wouters *et al.* indiquent qu'un serious game efficace devrait (Wouters, van Nimwegen, van Oostendorp, & van der Spek, 2013) :

- Eviter une narration trop élaborée pour ne pas surcharger cognitivement l'apprenant
- Eviter les graphismes photoréalistes car ils n'influencent pas positivement l'apprentissage par rapport à des graphismes non photoréalistes
- Jouer plusieurs fois au serious game.

Clark *et al.* (Clark, Tanner-Smith, & Killingsworth, 2016) quant à eux proposent 12 bonnes pratiques :

- Jouer plusieurs fois : jouer une seule fois ne conduit pas à un meilleur apprentissage que d'autres modalités
- Implémenter des instructions d'apprentissage uniquement en jeu (pas d'instructions sur l'apprentissage avant de jouer) : les instructions hors-jeu n'ont pas montré un meilleur effet sur l'apprentissage
- Employer des serious games non collaboratif et non compétitif
- Implémenter des mécaniques peu sophistiquées (comme des points ou des badges) : cela a un effet positif sur l'apprentissage
- Varier les actions possibles : les effets positifs sur l'apprentissage sont plus élevés avec un nombre moyen ou élevé d'actions
- Préférer des mécaniques de jeux intrinsèquement liées aux tâches d'apprentissage
- Intégrer des points de repère : e.g. indications sur les bonnes réponses
- Eviter un réalisme visuel trop élevé dans les graphismes

- Eviter des représentations trop anthropomorphiques des joueurs dans le jeu
- Préférer le point de vue à la troisième personne
- Mobiliser des éléments scénaristiques qui ne sont pas forcément directement lié au contenu de l'apprentissage
- Créer une profondeur moyenne dans l'histoire : les modifications du scénario selon les choix de l'apprenant ou les conséquences sur le déroulé du jeu doivent éviter d'être trop bas ou trop hauts

La vue d'ensemble de Wouters et van Oostendor sur les instructions des serious games relève 10 techniques positives pour l'apprentissage et la motivation (Wouters & van Oostendor, 2017) en échos ou en contradiction avec Clark *et al* (Clark *et al.*, 2016). : l'adaptivité/l'évaluation, la collaboration, l'intégration du contenu, l'intégration du contexte, le feedback, le degré de réalisme, la modélisation, les éléments narratifs et la réflexion. Cependant, Wouters et van Oostendor pointent que les contextes dans lesquels ces techniques d'instruction sont efficaces ne sont pas encore clairement établis.

2.1.2.2.3 Synthèse : entre serious game, jeu pour apprendre et simulation

Les serious games sont souvent étudiés en synonymie des jeux vidéo pour apprendre. Cela rend confus les apports scientifiques. Nous nous sommes alignés sur la définition de Djaouti *et al.* d'un serious game : « *tout logiciel fusionnant un but non divertissant (sérieux) avec une structure de jeu vidéo (jeu)* » (Djaouti *et al.*, 2011a). Cette définition est plus incluyente que d'autre et nous apparaît plus robuste. Afin de catégoriser nos apports, nous référons à la taxonomie proposée par Prieto de Lope et Medina *Comprehensive Serious Game (CSG) Taxonomy* (De Lope & Medina, 2016) : la simulation y est un sous-genre du serious game. Nos problématiques de recherche nous conduisent à nous concentrer sur les adultes (enjeux industriels). Pour autant la littérature scientifique portant sur les enfants est parfois pertinente dans notre démarche de recherche. La section 4.1.1 restitue les résultats d'une revue de la littérature sur l'efficacité des serious games pour apprendre.

2.1.2.3 Conclusion : le serious game

Le présent état de l'art s'est concentré à présenter le jeu vidéo en tant que média installé dans la société. Ce phénomène culturel invite à gamifier notamment l'éducation et l'apprentissage. À cet effet, les serious games sont développés. Ces serious games sont évalués et la notion même discutée scientifiquement. Le consensus scientifique indique une efficacité plus élevée du serious game sur d'autres modalités, particulièrement s'il y a plusieurs répétitions : motivation, engagement, performance. Cependant, les méta-analyses, revues systématiques et revues pointent toutes le manque de données robustes à cause de la faible fiabilité des études empiriques (voir section 4.1.1). Ainsi, plus d'apports empiriques répondant aux standards scientifiques sont nécessaires.

2.1.3 La Réalité Virtuelle (VR) pour Apprendre

2.1.3.1 Réalité virtuelle : vue d'ensemble

Selon Freina et Ott, le principe de Réalité Virtuelle en tant que dispositif apparaîtrait au début des années 1960 avec le Sensorama (1962) de Morton L. Heilig (Freina & Ott, 2015). Bien que Freina et Ott ainsi que Jerald n'hésitent pas à en reconnaître les prémises dès le 19^e siècle avec des murs

panoramiques pourvoyant des images à 360° ou le stéréoscope de Charles Wheatstone (Jerald, 2015). Ivan Sutherland, dans son célèbre article « *The Ultimate Display* » de 1965, décrit des propriétés d'un dispositif telles que nous les expérimentons de nos jours (Sutherland, 1965).

L'usage de l'appellation Réalité Virtuelle est attribuée à Jaron Lanier. Il est chercheur en informatique et créateur d'une des premières entreprises dédiées à la VR : VPL Research, Inc. En 1989, au Special Interest Group on Computer GRAPHics and Interactive Techniques (SIGGRAPH est la conférence la plus reconnues sur les questions d'informatique graphique et réalité virtuelle) le terme est consacré (J. Segura, 2012). Depuis, le terme est fortement employé dans la littérature scientifique à travers des apports de disciplines variées (Z. Feng, González, Amor, Lovreglio, & Cabrera-Guerrero, 2018). Il n'est pas rare qu'il soit utilisé en tant que synonyme d'Environnement Virtuel (e.g. pour décrire un simple logiciel disponible en local ou en ligne parfois dans la communauté des Sciences de l'Éducation) (Gigante, 1993). Certains chercheurs lui ont longtemps préféré « réalité artificielle » (Foley, 1987). Réalité Virtuelle est issu de l'anglais Virtual Reality. Le « Virtual » anglo-saxon a un autre sens que « Virtuel » en français. Ainsi, employer ce terme de Réalité Virtuelle conduit à plusieurs problématiques.

La première problématique est d'ordre théorique. En effet, le terme est considéré par certains comme un oxymore. Or, selon Noël, à travers l'approche de Deleuze analysant la notion de virtuel, cette intuition est à déconstruire (Noël, 2007). Ainsi, selon les approches philosophiques agrégées par Noël (celles de Quéau, Lévy et Granger), le virtuel s'oppose à l'actuel et non au réel. Cela pose une question épistémologique sur le terme à employer dans le cadre d'un travail scientifique (Tisseau, 2001). Nannipieri indique que selon la discipline s'emparant de la notion, celle-ci est employée à travers des constructions parfois incompatibles au gré des variables et leurs définitions employées afin de conceptualiser la réalité et la virtualité (Nannipieri, 2017). Il y a ainsi, en toute logique, une question sémiotique. Nous la relevons uniquement pour mieux situer nos travaux.

La seconde problématique est d'ordre technique ou d'usage. L'utilisation du terme se réfère plus souvent aux possibilités des dispositifs plutôt que celles offertes par les constructions conceptuelles. Ainsi, avec le retour récent des HMDs, tout usage d'un HMD devient synonyme de Réalité Virtuelle. Par exemple, le terme vient parfois qualifier les vidéos à 360°. Cependant, dans notre cadre conceptuel, le seul usage d'un HMD ne peut pas justifier d'invoquer la notion de Réalité Virtuelle. Notamment parce qu'en vidéo 360°, l'interaction ne conditionne pas le déroulement des événements. Dans notre cas, nous parlons bien de VR et non seulement de l'usage d'un HMD.

Ces nombreux emplois (Grumbach & Klinger, 2007) et apports de disciplines variées, rendent difficile la délimitation de la Réalité Virtuelle. Sauf à déconstruire, analyser et démêler chaque concept, travail en partie effectué par (Tisseau, 2001), puis chaque emploi. Fuchs qualifie cela d'une « *confusion de termes* » et indique qu'il est « *illusoire* » de ne pas user du terme Réalité Virtuelle (Fuchs, 2016). Aussi, nous employons Réalité Virtuelle en tant que traduction littérale d'après la notion en anglais et son sens particulier : où virtuel ne s'oppose pas à réel mais à actuel. Ensuite, selon nous, l'approche la plus parcimonieuse est de se positionner sur une définition puis d'en décrire les limites conceptuelles en corrélation avec les problématiques et enjeux précis de notre travail de recherche. Ainsi, il convient de rejoindre un paradigme en ce sens. Rappelons que notre problématique se concentre sur l'apprentissage et les perceptions

(notamment du système visuel humain) en VR (donc les facteurs humains) et leur prise en compte pour concevoir des contenus. Aussi, nous rejoignons la définition décrite comme « technique » de (Fuchs, Arnaldi, & Tisseau, 2006) :

« La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. »

Cette définition repose sur deux concepts : l'immersion et l'interaction. Son socle consiste à poser la boucle des « échanges » (sur un modèle Input/Output) entre monde réel et monde virtuel. Elle est nommée « boucle perception, décision, action » en référence aux travaux de Berthoz sur la perception et l'action (Berthoz, 2008). Cette boucle intègre le comportement de l'utilisateur dans le monde réel lorsqu'il est interfacé avec le monde virtuel. Les auteurs schématisent cette boucle ainsi :

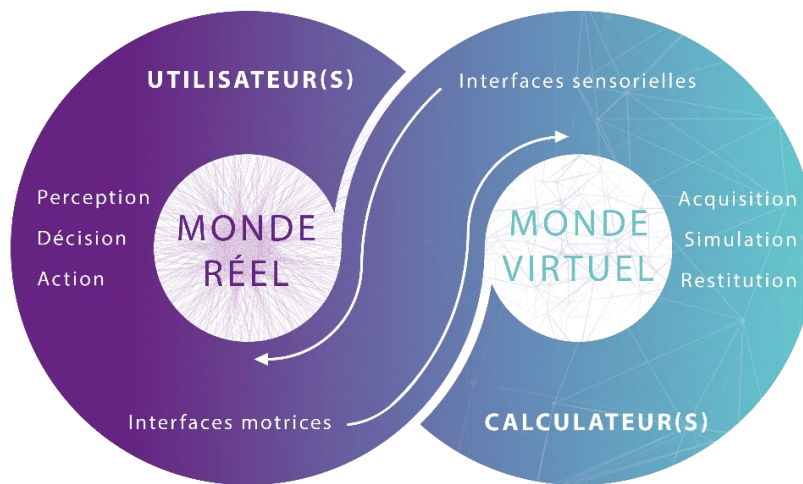


Figure 1 : « Boucle perception, décision, action » d'après Fuchs *et al.*, 2006, p. 9

Ensuite, cette définition de Réalité Virtuelle implique plusieurs niveaux d'analyse dont deux définis par les auteurs comme : technocentrique et anthropocentrique.

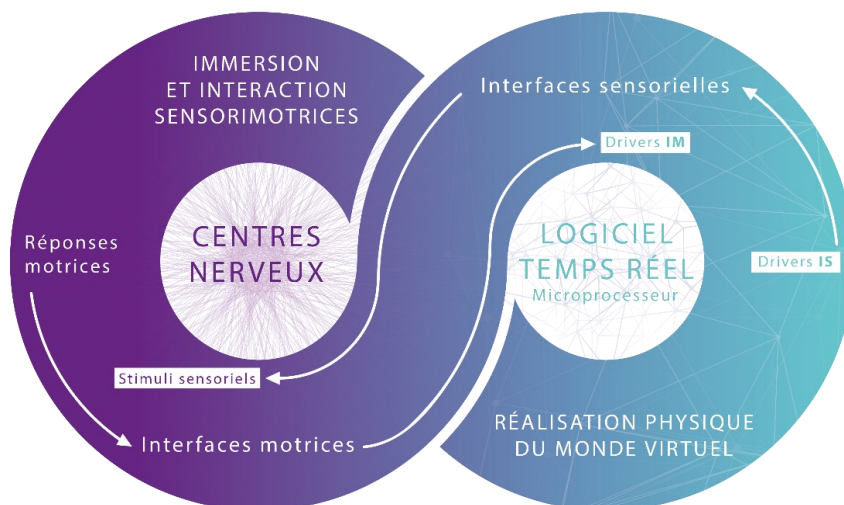


Figure 2 : Schéma technocentrique d'Immersion et d'Interaction d'après Fuchs *et al.*, 2006, p. 11

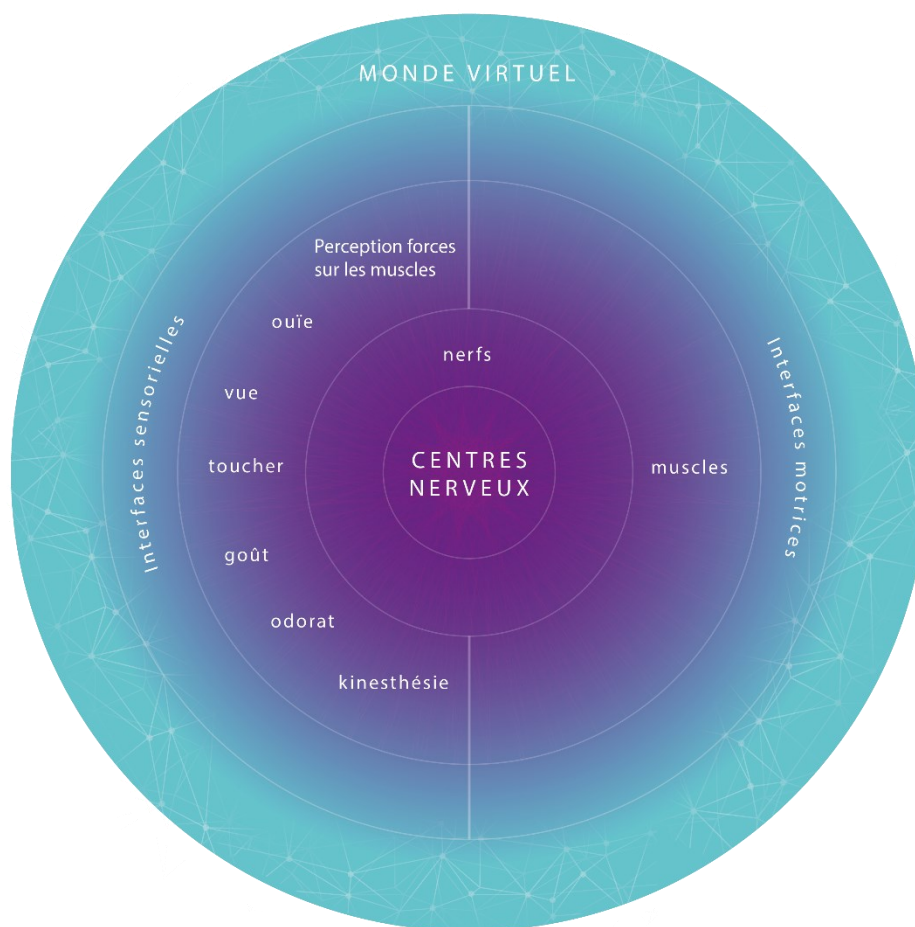


Figure 3 : Schéma anthropocentrique de la perception du monde virtuel de l'homme, d'après Fuchs *et al.*, 2006, p. 10

« *L'interaction en temps réel* » implique que l'utilisateur ne perçoive aucune latence dans le monde virtuel. Quant à « *l'immersion pseudo-naturelle* » elle correspond à l'efficacité d'immersion ressentie au plus efficace possible avec le dispositif proposé à l'utilisateur. Cela repose sur les « *interfaces comportementales* » décrivant les différents appareils construisant la VR et y interfaçant (ordinateur, HMD, casque audio, manettes, gants, ...). Selon la qualité de ces appareils, des incohérences sensorimotrices peuvent apparaître. Une partie de ces dernières est présentée dans notre section 2.3. Nous nous concentrons sur la notion d'immersion dans la section 2.1.5.2.

Burkhardt dénombre quatre types de dispositifs d'interactions exploités par la VR (Burkhardt, 2007) :

- « *les dispositifs de capture de position et de mouvement (capteurs, gant, combinaison, etc.)*,
- *les dispositifs de présentation visuels (grand écran, HMD, etc.)*,
- *les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés (toucher, chaleur, etc.)*,
- *les dispositifs d'entrée et de présentation sonore (son spatialisé, reconnaissance vocale, etc.)*. »

C'est donc sur la base de l'utilisation d'un ou plusieurs de ces dispositifs d'interaction, ce que Fuchs *et al.* définissent comme des interfaces comportementales, qu'il est possible d'immerger un utilisateur dans un monde virtuel avec plus ou moins de sollicitations de ses sens.

Notre positionnement sur cette définition de VR nous offre un paradigme afin d'analyser les implications de l'apprentissage via des Serious Games combinés à la VR en considérant certains facteurs humains (i.e. la fatigue visuelle). Cependant, cette définition ne permet pas des considérations philosophiques liées aux questions de Réalité et de Virtualité chez l'humain (Heim, 1994). Elle laisse cependant un espace aux considérations sociales car elle inclue les interactions entre les utilisateurs. Ceci nous autorise ainsi à concentrer nos analyses sur un champ délimité de dispositifs.

Nous avons restitué la définition de Fuchs *et al.* de la Réalité Virtuelle reposant sur les notions d'immersion et d'interaction. Elle a permis d'introduire la boucle de perception, décision, action ainsi que deux niveaux d'analyses : technocentrique et anthropocentrique. Dans ce travail de recherche, nous combinons ces deux niveaux d'analyse, actant ainsi notre ralliement à cette définition de Réalité Virtuelle. Nous proposons ensuite de décrire certains dispositifs permettant d'interfacer les utilisateurs à cette VR en nous concentrant sur les HMDs, objets d'intérêt de notre recherche.

2.1.3.1.1 Head Mounted Displays : vue d'ensemble

Dès 1935, la littérature de science-fiction avec Stanley G. Weinbaum et sa nouvelle *Pygmalion's Spectacles* décrit les dispositifs de réalité virtuelle. La VR est immersive. Plusieurs dispositifs permettent de fournir cette VR, ils sont le fruit de co-constructions à la croisée de nombreuses disciplines scientifiques (Sherman & Craig, 2018).

L'acronyme HMD est issu de l'anglais Head Mounted Display ou Helmet Mounted Display : visiocasque en Français. Shibata définit un HMD comme : « *une unité d'affichage d'images montées sur la tête* » (Shibata, 2002). Cette définition est très incluante. Dans notre cas, précisons qu'il s'agit de nous concentrer sur les HMDs permettant d'afficher de la VR : selon les conditions et modalités explicités dans la section 2.1.3.1. Un HMD-VR peut s'utiliser en position assise ou debout ou allongé.

Les historiques respectifs de Jerald et Segura ainsi que la chronologie des HMDs proposée par Ellis sur un site web de la NASA (Ellis, 2016 ; Jerald, 2015 ; J. Segura, 2012) permettent une vue exhaustive de la VR. Le premier HMD, semble être le « *Telesphere Mask.* » Il est breveté à la fin des années 1950 par l'ingénieur et inventeur Morton L. Heiling, domicilié à New York aux USA : « *Dispositif de télévision-stéréoscopique pour usage individuel* » (Heilig, 1960). Heiling invente par la suite le Sensorama.

En 1968 après la description 3 ans plus tôt du « *ultimate display* », Sutherland présente l'un des tous premiers HMDs (Sutherland, 1968). Cet appareil est baptisé « *The Sword of Damocles* » en réaction à l'aspect du dispositif : un trackeur de tête reliant le casque au « plafond » et allégeant la charge du casque, placé au-dessus de la tête de l'utilisateur (Gigante, 1993). Jusqu'à la seconde moitié des années 80, les apports viendront essentiellement de quelques chercheurs dans le secteur militaire ou les agences gouvernementales. Début 1990, le marché

de la VR se développe avec plusieurs entreprises. L'Entertainment, surtout le jeu vidéo, se saisit des HMDs dans les arcades. La technologie est un échec. Devant les performances insuffisantes des HMDs de cette période, les CAVE font leur entrée chez les industriels. CAVE signifie Cave Automatic Virtual Environment (Cruz-Neira, Sandin, & DeFanti, 1993). Un CAVE est un espace en forme de cube dont les murs sont constitués de trois à six écrans sur lesquels les contenus sont affichés le plus souvent grâce à des projecteurs. Les laboratoires de recherche (J. A. Jones, Suma, Krum, & Bolas, 2012), les industriels et les militaires continuent les développements. De 2000 à 2011 les HMDs ne sont plus très présents sur la scène grand public. En 2011, Sony lance un HMD, le HMZ-T1. Il est destiné au cinéma chez soi à porter sur sa tête. 2012, Palmer Luckey annonce le lancement d'un Kickstarter (financement participatif en ligne) pour son projet Oculus Rift. L'annonce de ce Kickstarter et la participation massive au financement du projet permet aux HMDs et la VR de revenir sur le devant de la scène. L'Oculus Rift DK1, le HMD avec ses outils logiciels, sort en 2013 pour les développeurs avec l'implication active de Steven M. LaValle (chercheur en informatique). Au même moment, Facebook rachète Oculus pour 3 milliards de dollars. L'Oculus Rift DK2 sort en 2014 et le grand public reçoit le HMD en 2016. Un nombre conséquent de HMDs d'Oculus et d'autres constructeurs sortent auprès du grand public depuis 2014 avec des qualités variables.

2.1.3.1.2 Marché, Usages, limites des HMDs et de la VR

À l'image du jeu vidéo, ce qui était auparavant circonscrit aux laboratoires, à l'armée ou aux agences gouvernementales a entamé sa démocratisation (Slater & Sanchez-Vives, 2016) vers le grand public, notamment pour la formation (Bailenson *et al.*, 2008). Cependant, cette démocratisation n'est pas encore massive. Depuis « *The Ultimate Display* » (Sutherland, 1965), les avancées en miniaturisation des composants électroniques puis l'augmentation des capacités de calcul (Rolland & Hua, 2005) aboutissent à des appareils abordables pour le grand public. Ces évolutions technologiques doivent beaucoup au marché du smartphone dont les découvertes ont directement profité aux HMDs. Ainsi, la démocratisation des HMDs (Krueger, 2016) semble être entamée (Kress, Saeedi, & Brac-de-la-Perriere, 2014). La livraison de la première version de l'Oculus Rift (Facebook) en 2016 est un tournant du marché des HMDs grand public. Depuis, plusieurs constructeurs se sont positionnés. Les principaux concurrents d'Oculus sont Vive avec le HTC et Sony avec le Playstation VR. La segmentation du marché dépend du public cible, les entreprises (pro) et le grand public, et du type de HMD : dépendant d'un smartphone, autonome ou dépendant d'un PC (voir Figure 4). Des gammes se sont donc organisées avec des prix variables. La Chine est le plus gros marché pour la Réalité Virtuelle.

Selon Statista combinant matériel informatique et logiciel, le marché mondial de la VR représentait 6.2 milliards de dollars en 2019 et un chiffre d'affaire monde de 16.3 milliards de dollars est prévu pour 2022 (S. Liu, 2019a). Selon Statista, les revenus des ventes mondiales de HMDs et d'accessoires sont passés de 685 millions de dollars en 2015 à 3.9 milliards de dollars en 2018 (Department, 2014). Selon Statista, en 2020, le nombre de HMDs vendus dans le monde devrait atteindre 68 millions d'unités comparé à 5 millions d'unités en 2016 (S. Liu, 2018).

Selon Statista, il y avait 171 millions d'utilisateurs de HMDs dans le monde en 2018 (S. Liu, 2019b). Selon Goldman Sachs, en 2025, il y aura 591 millions d'unités HMD installées (Bellini, Chen, Takayama, Sugiyama, & Kim, 2018). Selon Statista, les principaux vendeurs de HMDs

en 2018 étaient Sony (43%), Oculus-Facebook (19,4 %), HTC (12,9%) et Microsoft (3,2%). Le reste du marché (21%) est distribué entre d'autres acteurs : e.g. Samsung, Lenovo, Dell ou Acer (S. Liu, 2019c). Les ventes étant dominées par Sony (Playstation VR), on constate une dominance d'achat de HMDs pour le jeu vidéo. A noter qu'en 2017 et 2018 le Samsung Gear VR (dépendant d'un smartphone) était le HMD le plus distribué (les utilisateurs ont profité d'une offre de Samsung et ne l'ont donc pas forcément payé) (Bellini *et al.*, 2018)

Selon Statista, les revenus mondiaux des jeux vidéo vendu sur HMDs atteignaient 15.1 milliards de dollars et sont prévus à 22.9 milliards de dollars en 2020 (Department, 2016a). En 2020, ces jeux vidéo seront pour la plupart vendus pour des casques dépendant d'un PC mais suivis de très près pour des casques autonomes et enfin des casques dépendant d'une console de jeu (Department, 2016b). Selon Variety, en 2019, 1 million de copies de *Beat Saber* développé par Beat Games a été vendue en un an (sortie en novembre 2018).

Selon Market Research Future, le Marché de l'apprentissage en VR atteindrait un chiffre d'affaire mondial de 339 millions de dollars en 2023 avec une croissance de 42 % sur la période 2017-2023 (Sawant, 2019).



Figure 4 : Exemples de HMDs (a) Oculus Quest : autonome, (b) HTC Vive Cosmos : dépend d'un PC, (c) Samsung Gear : dépend d'un smartphone

En dehors du jeu vidéo, les champs d'application (prospectif ou en place) de la réalité virtuelle recouvrent presque tous les secteurs d'activité (Berntsen, Palacios, & Herranz, 2016). La santé : traiter l'anxiété et la dépression (Carl *et al.*, 2019 ; Fodor *et al.*, 2018), gestion de la souffrance lors de procédures chirurgicales (E. Chan, Foster, Sambell, & Leong, 2018), la réhabilitation (B. Wang *et al.*, 2019), phobies (Miloff *et al.*, 2019) ; Bien-être (Hirota *et al.*, 2019), développement personnel (M. C. Howard, 2019) ; Services (Trahan, Smith, & Talbot, 2019) ; Agroalimentaire (Lombart *et al.*, 2019) ; Vente et distribution (Bonetti, Warnaby, & Quinn, 2018) ; Banque/Finance (Lugmayr, Lim, Hollick, Khuu, & Chan, 2019) ; Construction (Davidson *et al.*, 2019) ; Énergie (Gonzaga *et al.*, 2018) ; Transport et Aérospatial (Durscher, Pankonien, & Bhagat, 2019) ; Défense militaire (X. Liu, Zhang, Hou, & Wang, 2018) ; Divertissement : pornographie (van Anandel, Kater, Reints, & Spiering, 2019), tourisme (Tussyadiah, Wang, & Jung, 2018) ; Sport (Neumann *et al.*, 2018) ; L'éducation (Kavanagh, Luxton-Reilly, Wuensche, & Plimmer, 2017) et la formation (Biggs, Geyer, Schroeder, Robinson, & Bradley, 2018).

La plupart des environnements virtuels en réalité virtuelle actuels sont développés avec les moteurs Unity 3D (Jerald *et al.*, 2014 ; Linowes, 2015) ou Unreal Engine (Mack & Ruud, 2019).

2.1.3.1.3 Réalité Virtuelle : problèmes soulevés

L'utilisation de la réalité virtuelle se heurte à des limites technologiques et des risques pour l'humain (Fuchs, 2018) : Slater et Sanchez-Vives notent de « réels » problèmes (Slater & Sanchez-Vives, 2016). Les effets induits par la VR (Cobb, Nichols, Ramsey, & Wilson, 1999 ; Nichols & Patel, 2002 ; Sharples, Cobb, Moody, & Wilson, 2008) sur la cognition et le comportement humain sont étudiés depuis les débuts dans ce champ technologique (Stanney, 1995 ; Stanney, Mourant, & Kennedy, 1998). Ainsi, le cybersickness (S. Davis, Nesbitt, & Nalivaiko, 2014) et la fatigue visuelle (Ukai & Howarth, 2008) sont deux limites ergonomiques (Stanney, 1995) particulièrement bloquantes pour l'adoption massive des HMDs et la VR. La section 2.3.3 de cette thèse décrit ces effets et se concentre sur la fatigue visuelle : objet central de notre recherche. Nombre d'effets notamment à long terme sont méconnus. Il serait donc utile de mener l'étude de ces effets d'une part et d'appliquer le principe de précaution quant à l'usage de la VR d'autre part (Steinicke, 2016). L'application première de la VR est dans le jeu vidéo, ainsi les problèmes d'addictions sont également posés bien qu'il n'y ait pas assez d'études sur le sujet pour le moment (A. V. Rajan *et al.*, 2018).

L'analyse info-communicationnelle de Bonfils décrit la VR comme proposant « *aux utilisateurs [des] expériences communicationnelles sensorielles et visuelles spécifiques dans des contextes variés* » (Bonfils, 2015). Pour Bonfils, cela implique que l'utilisateur mobilise son corps de manière inédite pour interagir avec son espace numérique, démontrant un nouveau rapport à la technique. Ce rapport inédit le conduit à appeler à un pragmatisme pour étudier les environnements immersifs. La VR est l'un des dispositifs brouillant les frontières d'usages auxquels l'homme a été habitué avec les outils numériques (Blandin, 2010). En effet, la VR brise les frontières entre monde numérique et physique. Lallart *et al.* considèrent la VR comme un outil de réalisme car l'utilisateur est plus que jamais acteur plutôt que spectateur (Lallart, Voisin, & Jouvent, 2014). Or, pour les individus avec des problèmes psychologiques (e.g. schizophrénie) : la perte de réalité est à considérer (Jouvent, 2008). Michaud voit dans le HMD une nouvelle ère pour la vision technoscientifique du monde, permettant aux humains d'avoir des interactions sociales au moins égales à celles du monde réel (Michaud, 2017). Il y a globalement des enjeux juridiques nouveaux amenés par la VR (Lemley & Volokh, 2018) : vie privée, agressions verbales, harcèlement, propriété intellectuelle, liberté d'expression et recours juridiques. Donc, l'adoption de la VR pose de nombreuses questions d'ergonomie autant que sociétales.

À l'image des serious games, nous voyons dans l'introduction des HMDs et la VR auprès du grand public l'avènement de rêves technoscientifiques et une dynamique transhumaniste sous-jacente : rapport au corps (Scott, 2015), l'humain apprenant (Şahin & Doğan, 2019), marchandisation du savoir (il y a un lien avec la cybernétique et ses ambitions à cet égard) (Lafontaine, 2000). Cette dynamique a clairement cours dans l'apprentissage via la VR (Karadeniz & Ergül, 2019). Nannipieri montre que la VR se voit octroyer une fonction de réenchanter le monde (Nannipieri, 2011). C'est pourquoi il apparaît opportun de poser rationnellement les bénéfices et les risques de la VR, particulièrement dans le domaine de l'apprentissage.

Les entreprises leaders du marché des HMDs sont aussi celles avec les moyens technologiques et la volonté de cette dynamique transhumaniste (Steinicke, 2016). À cet égard, un discours technophile est communiqué par ces entreprises pour vendre leurs productions mais les risques

associés sont peu évoqués par celles-ci. Cependant, les grandes annonces sur les révolutions dans l'éducation (PC, Tablettes etc) par l'arrivée d'une nouvelle technologies n'ont pas modifié fondamentalement les techniques pédagogiques ou d'apprentissage pour le moment (Olmos, Cavalcanti, Soler, Contero, & Alcañiz, 2018). Cela peut notamment s'expliquer par la défiance d'une part de la population envers la technologie. C'est ce que Nannipieri *et al.* qualifient de dichotomie entre technophiles et technophobes (Nannipieri *et al.*, 2014). Cette analyse peut d'ailleurs s'appliquer au jeu vidéo traité plus avant. Ainsi, traiter les problèmes d'ergonomie posés par la VR permettrait de rationaliser le rapport à cette technologie, particulièrement dans le cadre de l'apprentissage.

2.1.3.1.4 Synthèse : réalité virtuelle vue d'ensemble

Nous avons introduit la notion de réalité virtuelle en choisissant de nous ancrer dans une approche technique. Ensuite, nous avons restitué un bref historique des sorties des HMDs : les prémices datent de 1935, l'armée et les agences gouvernementales développent puis utilisent les HMDs des années 60 à 90 presque seules, les premiers pas des HMDs pour la VR dans l'industrie se sont soldés par un échec dans les années 90, le début des années 2000 voit l'utilisation des CAVE, ce n'est qu'en 2012 que les HMDs avec le projet Oculus Rift font leur grand retour. Puis, nous nous sommes concentrés sur la description technique des HMDs : il y a une grande interaction entre les composants smartphone et l'arrivée des HMDs nouvelle génération. Ensuite, nous avons restitué l'état du marché des HMDs et l'économie associée : les instituts prévoient une démocratisation accrue des dispositifs d'ici 2025, les acteurs principaux actuels sont : Sony, Samsung, Oculus-Facebook, Vive et Microsoft. Enfin, nous listons les problèmes soulevés par l'usage des HMDs : le cybersickness, la fatigue visuelle, l'inscription des ambitions technologiques et d'usages dans une dynamique transhumaniste au détriment d'une approche pragmatique bénéfiques/risques.

2.1.3.2 Réalité Virtuelle pour apprendre

2.1.3.2.1 Réalité Virtuelle et apprentissage

La réalité virtuelle, dès ses premiers pas, ambitionnait de former les humains (Furness, 1986). L'introduction des HMDs dans l'éducation (Arnaldi *et al.*, 2018), la formation (à l'image du serious game) est en cours et étudiée mais manque encore de preuves expérimentales reposant sur des designs robustes, dans des contextes variés (Mikropoulos & Natsis, 2011) et d'analyses théoriques (Jensen & Konradsen, 2018). Cependant, des avantages sont identifiables entre la VR et les autres médias (Amokrane, Lourdeaux, Barthès, & Burkhardt, 2008). *Second Life*, métavers (monde virtuel) développé par Linden Lab en 2003, référence des univers virtuels employé pour l'apprentissage est un outil gratuit à disposition décrit dans la littérature scientifique en Éducation (E. A. O'Connor & Domingo, 2017). En 2016, le métavers est rendu compatible avec l'Oculus Rift. Les contenus VR pour apprendre peuvent être considérés comme des médias différents des hypermédias bien qu'ils puissent implémenter ces derniers (Mellet d'Huart, 2001). L'introduction de la VR dans l'éducation est accueillie par certains comme positif (Olmos *et al.*, 2018). Le secteur militaire a été le premier à développer les technologies ayant conduit à l'actuelle VR pour des entraînements : par exemple de pilotages d'avions en 1982 (projet *Super Cockpit*). En France, l'industrie automobile s'est très vite dotée de la VR à des fins de prototypage et de simulation de conduite. Ces deux secteurs ont donc une avance

considérable de pratiques professionnelles dans lesquelles la VR joue, notamment, un rôle pour l'apprentissage.

L'introduction de la réalité virtuelle à des fins d'apprentissage répond à plusieurs enjeux :

- **Permettre la répétition** de l'apprentissage, de se corriger et pouvoir se tromper sans danger (Jensen & Konradsen, 2018) : à l'image du serious game cela fait écho aux quatre piliers de l'apprentissage (Dehaene, 2018)
- **Offrir des feedbacks** pour faciliter l'adoption de réflexes d'apprentissage (p. 49) (Arnaldi *et al.*, 2018) et un contrôle du déroulé des scénarios
- **Se former à distance** (Weiss & Jessel, 1998)
- **Maintenir la motivation** de l'apprenant (Suh & Prophet, 2018)
- **Modéliser et rendre tangibles des concepts** (Dede, Salzman, & Loftin, 1996), le difficilement accessible (Freina & Ott, 2015) ou des données complexes (Olshannikova, Ometov, Koucheryavy, & Olsson, 2015)
- **Expérimenter activement** l'apprentissage et des situations avec tâches authentiques (Mikropoulos & Natsis, 2011)
- **Collaborer dans un même espace** même en étant à distance (L. Zheng, Xie, & Liu, 2018)
- **Incarner** (être représenté en VR par un avatar) (Slater, 2017)
- **Faire plutôt qu'observer** (Slater & Sanchez-Vives, 2016)
- **Interagir** avec les objets d'apprentissage (Duncan, Miller, & Jiang, 2012)
- **Être immergé** et provoquer le sentiment de présence (Cummings & Bailenson, 2015)
- **Améliorer l'efficacité** d'apprentissage par rapport à d'autres modalités (López, 2018)
- **Économiser** des coûts de consommables et de déplacement (Arnaldi *et al.*, 2018)
- **Accomplir et apprendre des tâches fortement dépendantes des compétences psychomotrices** (e.g. : techniques chirurgicales) donc de la spatialisation (Sun, Wu, & Cai, 2018) : coordination yeux-mains, orientation spatiale, manipulations (Huber *et al.*, 2018). La stéréoscopie (voir section 2.2.3) joue un rôle prépondérant à cet égard.

Comme les serious games, le recours à la VR à des fins d'apprentissage se heurte à des problématiques de création des instructions (Jensen & Konradsen, 2018), de compétences de création des instructions par les enseignants (E. A. O'Connor & Domingo, 2017), de déploiement et d'acceptation par les apprenants (Velev & Zlateva, 2017), d'utilisabilité (Kavanagh *et al.*, 2017). L'apprentissage d'actes chirurgicaux est le secteur d'application et de recherche scientifique le plus développé en VR (Alaker, Wynn, & Arulampalam, 2016). Selon le rapport de Biggs *et al.* pour le compte de l'Office of Naval Research (USA), peu d'apports permettent d'appréhender les problématiques de charge cognitive lors de l'apprentissage avec la réalité virtuelle (Biggs *et al.*, 2018). Les problématiques soulevées par l'utilisation de la VR pour apprendre sont traitées de manière éparse mais il n'y a pas, à ce jour, de vue d'ensemble. Cependant, il y a par exemple : l'impact de la nouveauté de l'usage de la VR sur la formation (Markransky, Borre-Gude, & Mayer, 2019), des recommandations de design (Sherman & Craig, 2018), l'adoption par les enseignants (E. A. O'Connor & Domingo, 2017).

La réalité virtuelle s'intègre dans l'éducation et la formation avec des effets positifs rapportés (Arnaldi *et al.*, 2018 ; Biggs *et al.*, 2018 ; Jensen & Konradsen, 2018 ; Makransky *et al.*, 2019 ; Mikropoulos & Natsis, 2011 ; Slater & Sanchez-Vives, 2016). Les environnements virtuels sont développés dans un but d'apprentissage depuis les années 80 malgré le phénomène présenté et questionné comme nouveau ou émergent, à l'image des serious games. La réalité virtuelle se développe dans d'autres secteurs que le seul apprentissage (Berntsen *et al.*, 2016). La réalité virtuelle s'installe dans l'entreprise à des fins de formation, considérée par les services de ressources humaines (Khandelwal & Upadhyay, 2019). La VR répond efficacement à des enjeux concrets de l'apprentissage. Mais les facteurs pour créer un environnement d'apprentissage en VR efficace sont éparés. Aussi, nous nous proposons de les synthétiser dans la section suivante.

2.1.3.2.2 Quels facteurs pour créer un environnement d'apprentissage en VR efficace

Malgré l'amélioration des caractéristiques techniques des HMDs de dernière génération, leur implémentation, notamment dans le cadre professionnel, se heurte à des problématiques d'ergonomie de l'espace. À cet égard, Bellgardt *et al.* proposent des recommandations selon la nécessité pour l'utilisateur de rester assis, d'être debout et/ou se déplacer (Bellgardt *et al.*, 2017). Les auteurs identifient qu'assurer l'utilisation simple et adaptée de la VR au quotidien implique des choix d'interactions précis. Selon les utilisateurs, cette dimension de la compatibilité entre les interactions proposées et l'espace physique dans lequel ils se trouveront est à considérer. Par ailleurs, la multiplication des appareils pose des problèmes d'interopérabilité et de croisement des plateformes auxquels les militaires américains se heurtent (Schlueter *et al.*, 2017). En effet, nombre de leurs programmes de formation sont en VR mais sur des dispositifs variés et parfois développés avec des logiciels et langages différents. Les entreprises ou organismes de formations devraient considérer ces risques techniques. Les facteurs connus influençant la réception d'un environnement virtuel d'apprentissage :

- Lorsqu'il est demandé à des sujets de lire en VR, comparé à d'autres modalités, cela prend 10 % plus de temps (Rau, Zheng, Guo, & Li, 2018)
- Si un tutorat est nécessaire, il apparaît qu'aucune différence de perception et d'acceptabilité des utilisateurs ne soit identifiable entre un avatar (personne réelle représentée en VR) et agent virtuel (ordinateur représenté par un avatar) (S. Lim & Reeves, 2010)
- Les stéréotypes genrés et réflexes culturels sur les représentations des utilisateurs (avatars) ou agents virtuels influencent l'apprentissage en VR (Shang, Kallmann, & Arif, 2019)
- Selon le type de tâche, un avatar à la première personne (1PP) ou à la troisième personne (3PP) ainsi que son photoréalisme peuvent influencer la présence et la performance (Gorisse, 2019)
- Il est nécessaire d'aligner la fidélité ou la cohérence des tâches à effectuer avec les habitudes (attentes) de l'utilisateur (Lindeman & Beckhaus, 2009)
- Plus le temps d'immersion est élevé, plus les utilisateurs sont susceptibles de présenter des symptômes (voir section 2.3.2) de cybersickness et de déséquilibre (Murata, 2004) ou de fatigue visuelle (Yue, Wang, Hu, & Fang, 2018)

Ces 6 facteurs affectent l'expérience des utilisateurs en VR autant les facultés cognitives que la qualité perçue par ceux-ci. Aussi, ils sont à prendre en compte pour créer des expériences

efficaces d'apprentissage en VR. Cependant, plus d'apports scientifiques semblent nécessaires pour mieux appréhender les limites de la VR à des fins d'apprentissage.

2.1.3.2.3 Synthèse : la réalité virtuelle pour apprendre

Dans un premier temps, nous avons identifié 16 avantages à utiliser la VR pour apprendre : répéter, offrir des feedbacks, se former à distance, motiver, modéliser des concepts, rendre accessible des lieux, représenter des données complexes, collaborer dans un même espace virtuel, incarner (avatar), faire plutôt qu'observer, interagir, être immergé, améliorer l'apprentissage, économiser, spatialiser l'apprentissage. Il apparaît que les résultats portent souvent sur des retours subjectifs des sujets : motivations, présence, engagement ou immersion. De meilleures performances d'apprentissage sont le plus souvent notées. Plus de preuves empiriques sont nécessaires pour statuer de l'efficacité d'apprentissage de la VR comparé à d'autres modalités. Enfin, nous avons listé 6 facteurs à considérer afin de réaliser des environnements virtuels d'apprentissage efficaces.

2.1.3.3 Conclusion : VR pour apprendre

Cette section s'est concentrée sur la VR et son usage à des fins d'apprentissage. Nous avons pointé que la VR et les HMDs induisent des effets négatifs : e.g. cybersickness et fatigue visuelle. Nous avons évoqué que le travail sur les risques et conséquences de ces effets négatifs reste nécessaire (voir section 2.3). L'intégration de la VR dans la société se déroule plus sur la base de croyances technoscientifiques (transhumanisme) que de preuves scientifiques de bénéfices. L'éducation et la formation sont également concernées. Il apparaît nécessaire de qualifier les preuves scientifiques à disposition sur l'efficacité d'apprentissage en VR. Une montée en qualité expérimentale est requise pour évaluer l'efficacité d'apprentissage en VR. Il s'agit d'un enjeu scientifique autant qu'industriel pour qualifier les bénéfices éventuels de la VR.

2.1.4 Combinaison SG et VR

Sur les 129 publications retenues, selon leurs critères d'inclusions, pour la revue de Connolly *et al.* (2012, table 3, p. 667), un seul jeu se combinait à la VR (Connolly, Boyle, MacArthur, Hainey, & Boyle, 2012). Sur la base de la revue et taxonomie de Melin *et al.* nous constatons que les simulations en VR comportent des éléments gamifiés (Menin, Torchelsen, & Nedel, 2018), c'est la raison pour laquelle nous considérons les simulations comme un sous-genre du serious game en nous reportant à la taxonomie de Lope et Medina : *Comprehensive Serious Game (CSG) Taxonomy* (De Lope & Medina, 2016). Des liens (technologiques, créatifs, démarches d'apprentissages), sont identifiables entre le jeu vidéo et la réalité virtuelle (Bouvier, de Sorbier, Chaudeyrac, & Biri, 2008). Nous nous intéressons donc aux implications théoriques de ces liens dans le cadre de l'apprentissage.

2.1.4.1 Théories de l'Apprentissage pour SG-VR

2.1.4.1.1 Enjeux

Suivant les recommandations Tennyson et Volk, nous explicitons la « philosophie » induite par notre objet de recherche pour faciliter notre positionnement vis-à-vis des théories de l'apprentissage (Tennyson & Volk, 2015). Cela nécessite de se positionner au regard des 3 courants majeurs (Kay & Kibble, 2016) : Behaviorisme, Cognitivism et Constructivisme.

La problématique de la théorie de l'apprentissage compatible avec le serious game reste à ce jour posée (W. H. Wu, Hsiao, Wu, & Lin, 2012a). Notamment car la visée de divertissement du jeu vidéo grand public peut freiner l'efficacité des serious games à insuffler trop de « fun » comme l'échec de l'edutainment en témoigne : les apprenants s'amuse mais n'apprennent pas (Gee, 2008). Selon la revue de Wu *et al.*, la théorie de l'apprentissage la plus mobilisée dans le serious game est le constructivisme (W.-H. Wu, Chiou, Kao, Hu, & Huang, 2012b). Cela est confirmé par Mikropoulos et Natsis dans leur revue incluant 53 études empiriques (Mikropoulos & Natsis, 2011). Au regard des théories courantes, il apparaît effectivement que le serious game en tant que média, avec sa démarche puis ses objectifs pédagogiques associés se réfèrent au constructivisme. Cependant, dans notre cas, nous nous alignons avec les théories cognitivistes de l'apprentissage et cela pour trois raisons. Premièrement, le cadre général de nos travaux s'ancre dans la cybernétique. Deuxièmement, nous nous intéressons à la charge cognitive. Troisièmement, les enjeux d'apprentissage notre approche expérimentale s'appréhendent dans la théorie cognitiviste (mémorisation de bonnes réponses).

Comme relevé par Soler *et al.*, combiner SG et VR invite à considérer la théorie cognitive à travers deux approches (Soler, Contero, & Alcañiz, 2017) : la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia de (Mayer, 2014a) et la théorie de la cognition incarnée (embodied cognition). Nous allons les aborder toutes les deux ci-après. Toutes deux reposent sur la charge cognitive comme un acquis de la psychologie de l'apprentissage. Aussi, nous présentons cette dernière avant de nous concentrer sur les deux théories.

2.1.4.1.2 Charge cognitive

La charge cognitive est la quantité de ressources de la mémoire de travail utilisée (Leppink, 2017). Ces ressources de la mémoire de travail sont limitées. La théorie de la charge cognitive a particulièrement été développée pour le design d'instructions d'apprentissage. Selon Sweller, trois types de charges cognitives sont distinguées (Sweller, 2011) :

- Intrinsèque, la complexité des connaissances acquises sans référence à la manière dont ces connaissances sont acquises
- Extrinsèque, dépendante de la manière de présenter l'information et sont acquises
- Essentielle (germane), intégration de la connaissance en mémoire long-terme.

La théorie de la charge cognitive a unifié nombre d'apports scientifiques mais est critiquée (R. Moreno, 2010) notamment sur sa réfutabilité liée au manque de clarté et la distinction entre les types de charges (de Jong, 2010). C'est particulièrement le cas sur le troisième type de charge cognitive proposée par Sweller dite : essentielle (germane). Cette charge est censée permettre l'intégration de connaissances en mémoire long terme (Cowan, 2008). Elle est considérée dans la Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia présentée ci-après.

2.1.4.1.3 Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia

La théorie plus proche de nos enjeux de recherche tend à établir les principes de l'apprentissage multimédia et hypermédia. Il s'agit de la « Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia » développée par Mayer. Il définit sa théorie (Mayer, 2002) ainsi [notre traduction] :

« L'apprentissage multimédia apparaît lorsqu'un apprenant construit une représentation mentale à partir des mots et des images qui lui ont été présentés. »

Mayer spécifie directement à la suite de cette définition que [notre traduction] : « Cette définition est assez vaste pour inclure les environnements livresques contenant des textes et illustrations, les environnements informatiques consistant en narrations et animations, et les environnements jeux électroniques consistant en des discours interactifs et des micro-mondes animés. » Mayer établit (Mayer, 2009) que [notre traduction] : « La motivation est une partie importante pour compléter la théorie de l'apprentissage multimédia – comme cela peut être vu dans l'attraction des jeux vidéo, par exemple – donc des recherches sont nécessaires sur comment la motivation fonctionne dans l'apprentissage multimédia. » Cet appel trouve une résonance certaine avec notre objet de recherche. Aussi, nous restituons ci-après un aperçu de la théorie de Mayer (Mayer, 2014b).

La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia repose sur un postulat [notre traduction] « les apprenants peuvent mieux comprendre une explication quand elle est présentée en mots et en images plutôt qu'en mots seuls. » (Mayer, 2009). Il y a trois hypothèses fortes dans cette théorie (Mayer, 2002), résumées par la suite dans un schéma (voir Figure 5) :

- 1) Il existe deux canaux séparés, mais en interaction, chez l'humain, visuel et auditif, afin de traiter l'information (nommés « *dual channels* »),
- 2) Chaque canal a une capacité limitée de traitement (théorie de la charge cognitive) (nommé « *limited capacity* »),
- 3) Apprendre est un processus actif de filtrage, sélection, organisation d'informations préalables afin de former une représentation mentale cohérente puis une intégration basée sur les connaissances préalables (nommé « *active processing* »).

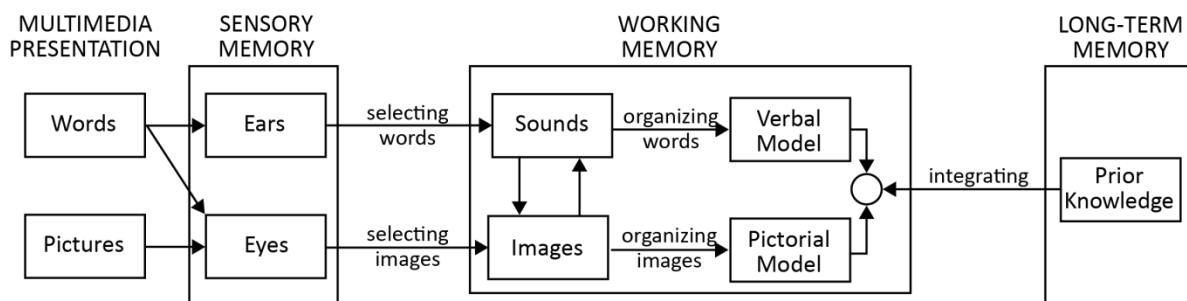


Figure 5 : Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia adapté d'après Mayer (2002, p. 103)

À travers ce modèle et la compilation de plusieurs données empiriques, selon l'auteur (Mayer, 2009) [notre traduction] : « En bref, l'avantage cognitif de la présentation simultanée est que les mots et les images correspondants peuvent plus facilement être conservés dans la mémoire de travail en même temps, ce qui encourage les apprenants à établir des liens entre les mots et les images. » La théorie s'intéresse notamment à la transmission de la connaissance par ce que Mayer nomme la « *présentation multimédia*. » À cet égard, l'auteur recommande 12 principes de design de ces présentations à considérer lors de la conception (Mayer, 2009). Ces 12 principes reposent sur des d'expériences avec des résultats venant corroborer ce qu'établit Mayer. Ils permettent ainsi de varier le « design » de la « présentation multimédia » pour un message efficace. Dans la recherche de preuves empiriques, nous constatons que Mayer étend son champ d'investigation jusqu'au jeu vidéo. Cette théorie repose ainsi sur plusieurs études apportant des données empiriques à considérer. Celles apportées pour supporter les principes décrits par

Mayer sont parfois issus d'expériences incluant la VR. Il est donc tentant d'appliquer la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia aux les SG en VR. Nous identifions toutefois plusieurs limites, notamment liées au dispositif particulier de la VR :

- 1) Certains jeux vidéo utilisés comportent un nombre d'interactions assez faible et ce média est par ailleurs sous-exploité comparé aux autres dans la théorie afin de fournir des données empiriques,
- 2) Le nombre de canaux à considérer devrait s'étendre. L'haptique n'est que très rarement évoqué dans cette théorie. Or, il s'agirait d'un « canal » supplémentaire à prendre en compte. La proprioception pourrait également être considérée dans le cas d'apprentissages impliquant une interaction importante avec l'environnement et ses objets (ex : formation pour effectuer une tâche de maintenance).

Ces manques, ou aspects peu traités, dans la théorie de Mayer sont considérés par la théorie de la cognition incarnée que nous présentons ci-après. En effet, nos travaux traitant des effets éventuels de la fatigue visuelle sur l'apprentissage, les implications du fonctionnement des systèmes de perceptions de l'humain en lien avec sa cognition sont déterminantes.

2.1.4.1.4 Théorie de la cognition incarnée

Le concept de cognition incarnée souffre de l'absence d'une définition consensuelle et d'une difficulté à se distinguer des concepts de la théorie cognitive standard (Shapiro, 2019). Selon Wilson, la cognition incarnée implique que (M. Wilson, 2002) : « *les processus cognitifs sont profondément enracinés dans les interactions du corps avec le monde.* » Selon Shapiro et Wilson, la théorie cognitive standard explique que le traitement cognitif est centralisé dans le cerveau. Les systèmes perceptuels et moteurs de l'humain sont considérés comme des inputs et outputs périphériques à la cognition. La théorie de la cognition incarnée vient réfuter cette périphérie des systèmes perceptifs et moteurs.

Wilson invite à se concentrer sur 6 principes [notre traduction] :

- 1) « *La cognition est située,*
- 2) *La cognition est contrainte par le temps,*
- 3) *Nous déchargeons le travail cognitif sur l'environnement,*
- 4) *L'environnement fait partie du système cognitif,*
- 5) *La cognition est à des fins d'action,*
- 6) *La cognition hors ligne est basée sur le corps.* »

La théorie de la cognition incarnée, bien que correspondant à de nombreuses observations est fortement critiquée : incohérence entre certaines prédictions et les données expérimentales (F. Adams, 2010 ; Goldinger, Papesh, Barnhart, Hansen, & Hout, 2016). Les détracteurs sont eux-mêmes critiqués et taxés d'exagération (Wołoszyn & Hohol, 2017).

Il y a un débat musclé car les tenants de la théorie de la cognition incarnée appellent à un changement de paradigme. Il ne nous revient pas la charge de prendre parti car les preuves avancées ne permettent pas un consensus à ce jour. En revanche, nous notons la proximité entre la théorie de la cognition incarnée et la notion *d'expérience communicationnelle immersive* que Bonfils

propose (Bonfils, 2014). De plus, la cognition incarnée est déclinée en applications concrètes pour l'apprentissage, notamment via la réalité virtuelle (Skulmowski & Rey, 2018). Soler *et al.* indiquent que la combinaison entre SG et VR invite à croiser les instructions et le game play en considérant la cognition incarnée (Soler *et al.*, 2017). Ils en ressortent des mécaniques de jeu permettant de respecter le but du serious game : un but sérieux et du « fun. » Cette même démarche est proposée par Johnson-Glenberg pour inclure les gestes et les interactions avec les mains en VR (Johnson-Glenberg, 2018). On constate ainsi, que la théorie de la cognition incarnée complète la théorie cognitive de l'apprentissage mais il est nécessaire de discuter l'emploi de ces deux théories dans notre démarche scientifique.

2.1.4.1.5 Théorie satisfaisant les enjeux SG-VR

Ces théories ont des limites selon critère de falsifiabilité (Ibekwe-Sanjuan & Durampart, 2018) de Karl Popper. Selon Jensen et Konradsen, la réalité virtuelle est appropriée (Jensen & Konradsen, 2018) pour appliquer les théories constructivistes, l'apprentissage actif et l'apprentissage fondé sur simulation. Chacune vient compléter les manquements des autres. Dans notre cas, la théorie de la cognition incarnée vient convenablement compléter les manques de la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia qui se concentrent sur deux entrées : visuelles et audios. La théorie de la cognition incarnée ajoute par exemple la proprioception et le tactile, relatifs au corps. Implicitement ou explicitement, la conception d'environnements virtuels d'apprentissage se base sur des prédictions de la théorie de la cognition incarnée. Cependant, le recours à cette théorie semble plus *ad hoc* que sur la base de preuves expérimentales. Enseigner et apprendre dépendent des enjeux psychologiques mais aussi sociaux. Les serious games et la réalité virtuelle reposent sur l'interaction des apprenants avec l'Environnement Virtuel mais également entre eux et dans un contexte culturel. Manzalab se réfère aux pédagogies dites inductives (Prince & Felder, 2007b), centrées sur l'apprenant, laissant la place à l'essai et donc l'échec, aux études de cas ou la résolution de problèmes et au travail en équipe (Prince & Felder, 2006). Cela peut potentiellement profiter aux apprenants (Prince & Felder, 2007a). Manzalab se concentre essentiellement à appliquer les 4 piliers de l'apprentissage (Dehaene, 2018). Manzalab se réfère à la Taxonomie de Bloom (Bloom *et al.*, 1984) afin de catégoriser l'apprentissage sur une échelle de 4 types d'apprentissages (factuel, conceptuel, procédural, métacognitif) et de ressource cognitive (se rappeler, comprendre, appliquer, analyser, évaluer et créer) (Heer, 2012). Ainsi, par l'approche pédagogique de Manzalab et les enjeux expérimentaux de nos recherches, la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia est la théorie de l'apprentissage la plus adaptée pour la combinaison serious games et la réalité virtuelle. Dans ce cadre conceptuel, la mémorisation est centrale et l'apprentissage peut être mesuré.

2.1.4.2 Mesurer l'apprentissage en SG-VR

2.1.4.2.1 Obtenir des traces d'apprentissage

La création de systèmes pour apprendre nécessite la capacité d'évaluer cet apprentissage et la théorie cognitive motive à procéder à la mesurer à cet effet. L'un des points forts de l'apprentissage par le numérique est la capacité à obtenir des « traces » de l'apprenant, c'est à dire des marqueurs d'activités et de performances (de Freitas, Rebolledo-Mendez, Liarokapis, Magoulas, & Poulouvasilis, 2009). De telles traces peuvent être interprétées et utilisées au profit du processus d'apprentissage (Corneloup *et al.*, 2016). C'est le principe des ITS (Intelligent

Tutoring Systems, Système Intelligent de Tutorat en français) comme HERA (Amokrane & Lourdeaux, 2008 ; Amokrane *et al.*, 2008) : le système repose sur des traitements algorithmiques de ces traces. Il en résulte la capacité de 1) guider en temps réel l'apprenant dans l'EV, 2) de fournir des données à l'instructeur et 3) d'adapter les tâches dans l'EV en fonction d'un parcours pédagogique dynamique. Dans notre cas, la question est comment évaluer, avec quelles métriques, l'apprentissage en SG-VR ? À cet effet, nous croisons les apports des serious games, de la réalité virtuelle et des méthodes utilisées dans des contextes d'apprentissage traditionnels.

Smith *et al.* réalisent une méta-analyse sur la collection des données d'apprentissage en serious game sur la base de 188 articles (S. P. Smith, Blackmore, & Nesbitt, 2015). Documentant les pratiques de collection des traces d'apprentissage, les auteurs notent que la collection a lieu sur 3 temporalités : avant de jouer (33%), pendant le jeu (21%) et après le jeu (46%). La collection des traces d'apprentissage en serious game est donc plus fréquente après le jeu. Selon Smith *et al.* 83% des études utilisent plusieurs méthodes de collecte : logs, questionnaires, tests, avec une dominante pour les questionnaires. Smith *et al.* indiquent que sur les 188 articles, la qualité d'expérience (flow, immersion, présence) est rarement mesurée pendant le jeu, le plus souvent après le jeu.

D'après Zolotaryova et Plokha, dans un serious game, l'évaluation de l'apprentissage peut se réaliser (Zolotaryova & Plokha, 2016) par l'estimation de l'engagement dans le jeu, l'évaluation du degré d'apprentissage achevé, en obtenant des informations sommatives (scores) et qualitatives.

Nous avons identifié 4 composantes de l'apprentissage, avec leurs méthodes d'évaluation spécifiques, mesurables : performances, rétention, transfert, comportements et cognition. Nous présentons ci-après ce modèle d'évaluation de l'apprentissage en SG-VR.

2.1.4.2.2 Performances

La performance correspond à la qualité d'accomplissement d'une tâche par rapport à un objectif donné (Soderstrom & Bjork, 2015). Ces performances peuvent être des métriques (preuves) de l'apprentissage (Bellotti, Kapralos, Lee, Moreno-Ger, & Berta, 2013). Selon nous, trois stratégies pour définir ces objectifs de performances sont identifiables : 1) Équivalent à d'autres modalités de mesures de l'apprentissage (papier-crayon, QCM, projet) dans le contexte donné : restitution en jeu des questions standards de l'objet d'apprentissage, 2) Opérantes seulement dans le cadre des règles de l'environnement virtuel (game design, instructions, système de points), 3) Complémentaires à d'autres métriques (tests normés).

La méta-analyses de Smith *et al.* note les variables comme métriques de la performance : nombre de bonnes ou mauvaises réponses, nombres d'essais avant de compléter la tâche, temps de réalisation de la tâche, niveau de complétion (S. P. Smith *et al.*, 2015).

2.1.4.2.3 Rétention

La rétention correspond aux « *informations stockées dans la mémoire à long terme de manière à pouvoir être facilement récupérées* » (Bennett & Rebello, 2012).

La rétention s'évalue donc quelques temps après l'expérience d'apprentissage. Le décalage varie en fonction des études : une semaine selon (Chittaro & Buttussi, 2015), quelques jours, voire semaines ou mois (S. P. Smith *et al.*, 2015).

Les principales méthodes d'évaluation de la rétention sont des questionnaires, souvent QCM. Cette pratique n'est toutefois pas normalisée et il ne semble pas exister de méthode faisant consensus dans la littérature ou un apport se proposant de synthétiser les métriques de la rétention.

2.1.4.2.4 Transfert

Le transfert consiste à mesurer la capacité de mobiliser les connaissances acquises dans un contexte plus large, général ou différent que celui dont sont issues les connaissances. Selon (Blume, Ford, Baldwin, & Huang, 2010), le transfert est [notre traduction] :

« constitué de deux dimensions principales : (a) la généralisation - la mesure avec laquelle les connaissances et les compétences acquises dans un milieu d'apprentissage sont appliquées à des milieux, des personnes ou des situations différents de ceux des personnes formées, et (b) l'entretien - la mesure avec laquelle les changements qui résultent d'une expérience d'apprentissage persistent avec le temps. »

Le transfert peut être dit « vertical » : réplication de l'apprentissage précédemment acquis dans une situation similaire ou construction de savoir supplémentaire sur cette base ; ou « horizontal » : utilisation de l'apprentissage précédemment acquis dans une situation très différente ou construction du savoir supplémentaire sur cette base dans un contexte différent (Bossard, Kermarrec, Buche, & Tisseau, 2008).

La méta-analyse de Blume *et al.* incluant 89 articles indique que le transfert est mesuré de deux manières : l'auto-évaluation des apprenants et l'évaluation par les enseignants ou les pairs. Il s'agit le plus souvent de questions en dehors du champ direct de l'apprentissage initial ou plus générales. Les méthodes mobilisées sont les questionnaires d'auto-évaluation (échelles de Likert : motivation, plaisir) et les tests (normés par exemples) (Burke & Hutchins, 2007). Ces mesures sont le plus souvent opérées directement après l'apprentissage. C'est à ce moment que le taux de transfert est le plus élevé comparé à des mesures plus tardives (1 semaine ou plus après la formation).

2.1.4.2.5 Comportements et Cognition

Nous procédons ici à une description des stratégies et outils envisageables essentiellement à des fins de documentation mais également parce qu'ils sont largement évoqués par les travaux présentés en section 4.1.

Principe

La notion de comportements dans le cadre de l'apprentissage (Staddon, 2016) avec des SG-VR est plus abstraite que les composantes précédemment présentées. Elle recouvre des variables nombreuses et fortement tributaires des instructions, du design des expériences immersives et du matériel utilisé. Nous nous intéressons précisément aux traces pouvant être obtenues pendant le jeu et se traduisant en indicateurs d'apprentissage :

- Suivi du regard (attention visuelle, stratégie de détection des éléments d'apprentissage). En SIC, l'oculomètre a été utilisé à des fins de « *reconstituer et comprendre le schéma de la lecture hypertextuelle* » (Koszowska-Nowakowska & Renucci, 2011).
- Émotions de l'apprenant (stress, joie, peur...)
- Stratégie de résolution de problèmes (A. Walker & Leary, 2009)
- Occupation de l'espace virtuel (gestes réalisés, position du corps réel et de l'avatar)
- Interactions avec l'environnement virtuel (objets pris en main, utilisés, sélectionnés par le regard)
- Interaction avec d'autres apprenants dans le cadre de la collaboration
- Déclarations orales lors de l'immersion

L'évaluation des comportements et de l'état cognitif de l'apprenant repose sur des méthodes de collecte de données variées :

- Recueil de biomarqueurs : suivi des yeux par oculomètre (video oculography - VOG) (Goldberg & Wichansky, 2003) (voir section 3.3.2), suivi du rythme cardiaque par Électrocardiographie (ECG), suivi de la sudation par mesure de la conductance cutanée (galvanic skin response - GCR) (Chao, Wu, Yau, Feng, & Tseng, 2017), suivi de l'activité cérébrale par mesure des ondes (électroencéphalographie - EEG) (Marín-Morales *et al.*, 2018). Les senseurs à utiliser et l'interprétation des données collectées pour établir ces biomarqueurs font encore l'objet de recherches. Les outils de mesure peuvent être difficiles à déployer avec un HMD : poids, surcharge d'appareils sur l'apprenant, nombre exponentiel de data collectées à traiter, artefacts dus aux mouvements de l'apprenant
- Tests psychologiques de mémoire et de temps de réaction
- Analyse d'enregistrement audio et vidéo des sessions d'apprentissage, qu'il s'agisse de ce qui se passe dans l'environnement virtuel et en dehors
- Recours à l'observation par l'enseignant (ou un tiers) avec des méthodes issues de la sociologie ou de l'ethnologie. Des limites sont à considérer. La subjectivité : manque de reproductibilité si on change d'observateur. Il est difficile de comparer les résultats entre études.

Ces variables sont à considérer même si leur recueil apparaît encore prématuré pour procéder à une analyse solide de l'apprentissage.

Tests psychologiques pour mesurer la charge cognitive

Deux tests largement employés en psychologie et disponibles sur ordinateur dans la bibliothèque Open Source PsyToolkit sont mis à disposition par le Professeur (Psychologie) Gijbort Stoet de l'University of Essex : www.psytoolkit.org :

Le **Deary–Liewald Reaction Time Task**¹ (Deary, Liewald, & Nissan, 2011). Il permet de mesurer le temps de réaction. Dans la première partie du test, un carré blanc est positionné au centre de l'écran, sur un fond bleu. Les participants doivent réagir à l'apparition d'une croix en diagonale dans le carré. Chaque fois qu'une croix apparaît, les participants doivent appuyer sur une touche de clavier aussi rapidement que possible. Chaque croix reste à l'écran jusqu'à ce

¹ https://www.psytoolkit.org/experiment-library/deary_liewald.html

qu'une touche soit activée, après quoi elle disparaît et une autre croix apparaît. L'intervalle entre stimuli (intervalle de temps entre l'activation d'une touche et l'apparition d'une croix) est compris entre 1 et 3 s. Dans la seconde partie du test, la même logique utilisée avec 4 carrés alignés horizontalement. La croix apparaît dans l'un des carrés. Les participants doivent appuyer sur la touche correspondant au carré. Le test mesure 2 variables : le temps de réponse (en ms) et le statut de la réponse (1=correct, 2=erreur, 3=trop lent).

Le **Corsi Block Tapping Task**² (Kessels, van Zandvoort, Postma, Kappelle, & de Haan, 2000). Il permet de mesurer la mémoire de travail visuo-spatiale court terme (mémoire spatiale). Le sujet est face à un écran présentant plusieurs blocs. Ces blocs s'allument par séquences aléatoires. Le test consiste pour le sujet à observer les séquences puis les répéter en cliquant sur les carrés à l'aide d'une souris d'ordinateur. Si le participant se trompe, un émoticon rouge et malheureux s'affiche. Si le participant a reproduit correctement la séquence, un émoticon jaune souriant s'affiche. La tâche commence par une séquence courte, généralement 2 blocs, et la difficulté augmente progressivement jusqu'à 9 blocs. Le test mesure 2 variables : le nombre de séquences correctes et la séquence la plus longue mémorisée.

Oculomètre pour mesurer la charge cognitive

Nous avons présenté le principe de l'oculomètre dans la section traitant de la mesure de la fatigue visuelle (voir section 3.3.2.1) et les solutions existantes en HMDs (voir section 3.3.2.2). L'oculomètre est ici considéré pour mesurer la charge cognitive (Anmarkrud, Andresen, & Bråten, 2019) et l'état cognitif des apprenants (Sonntag *et al.*, 2015).

Nous avons revu 11 apports expérimentaux (voir Annexe 1) publiés sur la période 2015-2019. La charge cognitive est le plus souvent mesurée via la taille de la pupille (Appel, Scharinger, Gerjets, & Kasneci, 2018 ; Bednarik *et al.*, 2018 ; Bhavsar, Srinivasan, & Srinivasan, 2018 ; Duchowski *et al.*, 2018 ; Hopstaken, van der Linden, Bakker, Kompier, & Leung, 2016 ; Jacob, Bukhari, Ishimaru, & Dengel, 2018 ; Kosch, Hassib, Woźniak, Buschek, & Alt, 2018 ; Parikh & Kalva, 2018 ; Peitek, Siegmund, Parnin, Apel, & Brechmann, 2018 ; Yamada & Kobayashi, 2017 ; Zagermann, Pfeil, & Reiterer, 2018). Globalement, la dilatation de la pupille est associée avec une charge cognitive plus élevée et une attention visuelle plus élevée. La revue systématique de Peinkhofer *et al.* incluant 258 articles montre que la taille de la pupille est un prédicteur de la charge cognitive. Selon Eckstein *et al.*, les changements induits par des charges sur la mémoire de travail fait varier la taille de la pupille de 0,5 mm.

Bien que pouvant être associée à l'attention, de nombreuses variables environnementales sont identifiées comme pouvant impacter la variation de la taille de la pupille (Peinkhofer, Knudsen, Moretti, & Kondziella, 2019) : couleurs d'une scène, luminosité, mouvements, émotions et charge cognitive (B. John, Raiturkar, Banerjee, & Jain, 2018). Ainsi, l'oculomètre apparaît intéressant pour mesurer l'apprentissage à travers les comportements et la cognition mais il nécessite de mieux qualifier les possibilités d'un tel outil dans un cadre écologique.

² <https://www.psychtoolkit.org/experiment-library/corsi.html>

2.1.4.2.6 Synthèse mesurer l'apprentissage en SG-VR

La plupart des apports concernant l'évaluation de l'apprentissage concernent l'école et des enfants apprenants. Notre contexte de recherche est différent et concerne principalement des adultes en entreprise. Nous avons présenté les 4 types d'évaluations à envisager : performance, rétention, transfert puis comportements et cognition. Les questionnaires demeurent la méthode de recueil de l'efficacité d'apprentissage la plus répandue. L'intérêt de la combinaison SG-VR est d'enregistrer les traces d'apprentissage pendant l'exposition aux contenus (Zolotaryova & Plokha, 2016). La méta-analyse de Smith *et al.* montre qu'il s'agit de la stratégie d'évaluation la moins utilisée dans le serious game (S. P. Smith *et al.*, 2015). La collecte de scores, de nombre d'erreur et du temps de réponse sont des pistes utiles pouvant compléter les tests de connaissance avant et après exposition aux contenus d'apprentissage. Le recours aux biomarqueurs a tendance à augmenter. Cependant, dans notre cadre expérimental, il est trop coûteux et difficile à mettre en œuvre la collecte de biomarqueurs avec le HMD employé à date (voir section 3.8.). Mais nous les avons présentés afin de documenter des repères méthodologiques aux pairs et aux entreprises.

2.1.4.3 Conclusion : combinaison SG-VR

Dans un premier temps, nous avons présenté l'environnement théorique propice pour appréhender l'apprentissage en SG-VR. La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia s'apprête le mieux à nos enjeux de recherche. Dans un second temps, nous avons spécifié les 4 stratégies à employer afin d'évaluer l'apprentissage avec un SG-VR : performances, rétention, transfert puis comportements et cognition. Les questionnaires sont le plus souvent utilisés après l'exposition au SG-VR afin d'évaluer l'apprentissage. L'intérêt des SG-VR est la capacité à récupérer des traces d'apprentissage. Combiner les différentes approches d'évaluation semble le plus efficace afin d'obtenir un état des connaissances des apprenants. Les SG-VR conduisent une meilleure efficacité d'apprentissage en VR comparés à d'autres dispositifs ainsi qu'une meilleure qualité d'expérience (présence, immersion, motivation). La section 4.1.3 se concentre sur les preuves dans la littérature sur l'efficacité d'apprentissage avec la combinaison SG-VR. La prochaine section se concentre sur la qualité d'expérience permettant d'englober la relation des apprenants envers les SG et la VR après usage.

2.1.5 Qualité d'Expérience (QoE)

2.1.5.1 Qualité d'expérience et SG-VR

La qualité d'expérience est une composante de l'appréciation, par leurs sensations, des utilisateurs en relation avec les dispositifs immersifs (Gaggioli, Bassi, & Delle-Fave, 2003). Dans l'apprentissage, cela influence par exemple le transfert (Broad, 1997). Selon Alexander *et al.*, quatre facteurs influencent le degré de transfert : la fidélité [de l'Environnement Virtuel], l'immersion, la présence et l'acceptation de l'utilisateur (Alexander, Brunyé, & Sidman, 2005). La présence et l'immersion sont les concepts clefs de la qualité d'expérience en VR. La littérature sur les serious games se concentre quant à elle le plus souvent sur les concepts de Flow et d'Engagement. La qualité d'expérience est le plus souvent mesurée à travers des questionnaires ou l'accomplissement de tâches (E. A. Boyle, Connolly, Hainey, & Boyle, 2012 ; Burkhardt, 2007 ; Engeser & Rheinberg, 2008 ; Henrie, Halverson, & Graham, 2015 ; Jennett *et al.*, 2008 ;

Takatalo, Häkkinen, Kaistinen, & Nyman, 2009). Ces questionnaires permettent tous de recueillir les ressentis liés au dispositif et son influence sur la motivation et l'attention (sous-jacentes à ces concepts) des apprenants conditionnant par exemple le transfert.

Ces concepts sont multifactoriels et chaque discipline, en fonction de ses enjeux particuliers, se reporte à des définitions et des approches hétérogènes, pouvant grandement diverger. Dans notre contexte, les variables d'intérêt pouvant influencer la qualité d'expérience sont : le type d'imagerie (stéréoscopie ou non), le degré d'immersion du dispositif (PC, CAVE, HMD), la difficulté des tâches, le degré d'interaction avec l'environnement virtuel, représentation dans l'environnement virtuel ou non (avatar). Ces variables sont le plus souvent mesurées via questionnaires. À l'image de l'apprentissage, des mesures dites objectives sont également opérées pour les évaluer : le rythme cardiaque (ECG), les activités du cerveau liées à l'attention (EEG/ERP), la sudation (GSR), les activités musculaires (EMG) ou encore la posture sont révélateurs de chacune des dimensions de la qualité d'expérience. Croisant les questionnaires, certains items varient d'un mot ou d'une formulation mais se veulent recueillir le même sentiment de l'utilisateur. La différence des résultats obtenus via des mesures objectives ou des questionnaires peut être attribués aux stimuli (i.e. un jeu vidéo ou une simulation ou un test spécialement développé ou un serious game). Ils conditionnent le recueil de ces données à travers les modèles de questionnaires et les relevés objectifs. Cependant, compte tenu de la richesse des stimuli proposés à travers les expériences en SG et VR, isoler les facteurs précis révélant la fluctuation des variables étudiées apparaît difficile. Il y a donc un biais à considérer dans ces résultats obtenus en condition écologique et non avec des stimuli très simples. Cependant, recueillir des données écologiques est nécessaire pour être au plus proche de l'expérience utilisateur réelle lorsqu'ils emploient des dispositifs comme les SG et la VR. Nous présentons donc les concepts à considérer dans l'apprentissage via SG-VR.

2.1.5.2 Présence et Immersion

2.1.5.2.1 Définition et principes

L'immersion correspond au potentiel technologique du dispositif à proposer un environnement virtuel assez riche (capacité à prodiguer des stimuli affectant le plus de sens humains possible) (Cummings & Bailenson, 2015) pour qu'il se substitue au monde primaire (concept issu du « *continuum réalité-virtualité* » (Milgram, Takemura, Utsumi, & Kishino, 1995)). La présence, selon Slater, correspond à un état de conscience psychologique d'un individu, [notre traduction] « *la forte illusion d'être dans un lieu malgré le fait de savoir que vous n'êtes pas là* » (Slater, 2009). Ainsi, l'immersion influence le degré de présence et réciproquement (Sanchez-Vives & Slater, 2005) (Cummings & Bailenson, 2015 ; A. McMahan, 2003). Les caractéristiques immersives fait varier le sentiment de présence sont (Nannipieri, 2017) : le degré d'interaction, la richesse sensorielle, la réduction des incohérences sensori-motrices, le réalisme ou la plausibilité de l'environnement, l'incarnation d'un avatar ou non et le scénario ou la tâche à accomplir. Lee pose trois dimensions de la présence qu'il définit ensuite (K. M. Lee, 2004) [notre traduction] :

- **Présence physique** : « *État psychologique dans lequel les objets (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des objets réels physiques de manière sensorielle* »

ou non. » Les conditions de la présence physique sont : la perception des objets dans l'environnement virtuel, localiser son corps par rapport à l'environnement. L'utilisateur peut réaliser des actions spatialisées.

- **Présence sociale** : « *État psychologique dans lequel les acteurs sociaux (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des acteurs sociaux réels de manière sensorielle ou non.* » Biocca *et al.* le résume en un « *sens d'être avec un autre* » (Biocca, Harms, & Burgoon, 2003). Cet autre peut-être un utilisateur ou un agent dans l'environnement virtuel.
- **Présence de soi** : « *État psychologique dans lequel le soi/nous virtuel (para-authentique ou artificiel) est expérimenté en tant que soi réel de manière sensorielle ou non-sensorielle.* » La présence de soi est intimement liée l'agentivité, c'est à dire à l'utilisation d'un avatar et du contrôle de l'utilisateur sur son avatar (Blanke & Metzinger, 2009 ; Jeunet, Albert, & Argelaguet, 2018).

Par une analyse info-communicationnelle, Bonfils et Renucci indiquent que la présence de l'avatar, particulièrement dans les environnements 3D interactifs, conduit à reproduire des comportements de communication non-verbale (Bonfils & Renucci, 2008). Dans notre dynamique, il s'agit de considérer la Présence comme un marqueur de la qualité d'expérience. La Présence est assimilée au degré d'immersion des utilisateurs. Sa mesure dans le cadre de l'apprentissage fait l'objet d'apports expérimentaux dont nous présentons une fraction dans la section suivante.

2.1.5.2.2 Résultats expérimentaux : présence et apprentissage

Nous présentons 8 apports expérimentaux permettant de résumer les effets souvent associés à la présence en nous focalisant sur les effets sur l'apprentissage avec HMDs et d'autres dispositifs immersifs. Bowman *et al.* indiquent que plus le degré d'immersion est important (d'écran d'ordinateur à HMD) plus la capacité des sujets à se rappeler une information est bonne (Bowman, Sowndararajan, Ragan, & Kopper, 2009). Limperos *et al.* font jouer 39 étudiants au jeu vidéo « Ridge racer 3D » sur Nintendo 3Ds (Limperos, Waddell, Ivory, & Ivory, 2014). Les auteurs comparent plusieurs conditions dont 2D vs S3D. Leurs résultats indiquent que les joueurs non experts (jouant moins d'une fois par semaine aux jeux vidéo) sont plus enclins à rapporter une plus grande présence et immersion en condition S3D par rapport aux experts. Freeman *et al.*, la S3D conduit à un plus haut degré de présence que la 2D (Freeman, Avons, Pearson, & IJsselsteijn, 1999). Hamari *et al.* à l'issue de deux expériences concluent que plus l'engagement (voir section suivante) est élevé plus l'apprentissage est efficace, à l'inverse de l'immersion (Hamari *et al.*, 2016). Selon Schroeder *et al.*, la présence n'est pas prédictive de l'apprentissage en VR. Ils ont comparé la présence rapportée par 75 sujets et la rétention des étapes d'assemblage d'un moteur. La formation consistait au même contenu déployé en trois conditions sur PC ou avec un HMD (Oculus Rift DK2) avec ou sans gestes (B. L. Schroeder, Bailey, Johnson, & Gonzalez-Holland, 2017). Thalmann *et al.*, proposent 4 conditions d'immersion différentes (TV, alioscopie, 320 CAVE®, Oculus® rift DK2™) auprès de 16 sujets pour jouer à jeu de volleyball. La présence spatiale et la présence sociale annoncées par les sujets sont meilleurs en CAVE® et en Oculus® rift DK2™ (D. Thalmann, Lee, & Thalmann, 2016) par rapport à la TV et à l'alioscopie. Comparant une interface hypertexte à un SG avec des étudiants (N=84) dont l'apprentissage consiste en un exercice d'électricité, Schrader et Bastiaens indiquent que la présence était plus élevée avec le SG (Schrader & Bastiaens, 2012).

Selon les auteurs, la présence pourrait avoir un lien avec l'attention. Selzer *et al.*, au contraire, indiquent que le degré de présence est lié à un meilleur apprentissage en VR (Selzer, Gazcon, & Larrea, 2019). Les auteurs comparent 3 groupes : PC, HMD bas de gamme (VR-Box + Motorola Moto G5), HMD haut de gamme (Oculus Rift CV1). Les 42 sujets doivent apprendre la géographie et la faune de Wetland de la Villa del Mar (Argentine). Leur rétention, compréhension et transfert sont évalués, la Présence est mesurée via le Presence Questionnaire (PQ) et le Cybersickness via le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Selzer *et al.* notent qu'il n'y a pas de différence d'apprentissage entre le HMD bas de gamme et le haut de gamme. Le cybersickness rapporté par les sujets avec le HMD bas de gamme n'impacte pas négativement l'apprentissage.

2.1.5.2.3 Synthèse : présence

La Présence est tantôt annoncée comme influant l'apprentissage tantôt non. La Présence est souvent un état à atteindre pour les utilisateurs sur lequel comptent les concepteurs des environnements virtuels. Dans des cadres autres que le seul apprentissage une haute présence semble corrélée à l'affichage de stéréoscopique (Ahn *et al.*, 2014 ; Bae, Eller, & Lang, 2012 ; S.-N. Yang *et al.*, 2012), à la capacité à réaliser des mouvements (Slater & Sanchez-Vives, 2016), à la capacité élevée d'immersion du dispositif (Selzer *et al.*, 2019). Les questionnaires mesurant la Présence sont très variés mais ils représentent le moyen privilégié afin de mesurer la Présence. Freeman *et al.* pointent les limitations de l'utilisation de questionnaires afin de recueillir le degré de présence des utilisateurs (Freeman *et al.*, 1999).

2.1.5.3 Flow et Engagement

2.1.5.3.1 Définition et principes

Du point de vue de l'apprentissage, l'engagement correspond à l'implication de l'apprenant, à sa démarche active envers l'apprentissage et dans le processus cognitif (Iqbal, Kankaanranta, & Neittaanmäki, 2010). Cet engagement semble encouragé par les jeux vidéo (E. A. Boyle *et al.*, 2012 ; Burkhardt, 2007 ; Henrie *et al.*, 2015 ; Jennett *et al.*, 2008 ; Takatalo *et al.*, 2009). Il n'y a pas de véritable théorie de l'engagement et ses définitions sont diverses (Boekaerts, 2016). Selon Whitton et son modèle, l'engagement engloberait l'immersion (Whitton, 2010) mais nous les traitons séparément dans notre approche. L'engagement est initialement lié à l'école et le rapport de l'élève à celle-ci avec les différentes médiations déployées (Fredricks & McColskey, 2012).

Le Flow, introduit par Csikszentmihalyi et faisant référence dans la littérature, s'étend quant à lui à toutes les activités de la vie humaine (Csikszentmihalyi, 1990). Cette notion correspond à un état optimal de motivation intrinsèque mobilisant toutes les ressources d'une personne vers l'action entreprise, se retrouvant totalement absorbée et au maximum de ses capacités. L'état mental de flow peut se caractériser par le niveau de défi et d'habileté : excitation, anxiété, inquiétudes, apathie, ennui, relaxation et contrôle (Csikszentmihalyi, 2008). Le flow est également très lié au plaisir procuré par l'activité.

Csikszentmihalyi a directement appliqué son concept à l'apprentissage (M. M. Wong & Csikszentmihalyi, 1991). Par la suite, les études des Interactions Hommes-Machines se sont emparées du concept. Il s'est donc retrouvé dans la communauté des SG et du jeu vidéo en

général, avec plus ou moins de succès (Procci, Singer, Levy, & Bowers, 2012), mais pour finalement être adopté comme indicateur de la qualité d'expérience et une preuve d'engagement (Hamari & Koivisto, 2014 ; Kiili, Lainema, de Freitas, & Arnab, 2014 ; Majaranta & Riih , 2012 ; Sharek & Wiebe, 2014 ; Tozman, Magdas, MacDougall, & Vollmeyer, 2015).

Dans notre dynamique, il s'agit de considérer le Flow comme un marqueur de la qualité d'expérience. Le Flow est assimilé au degré d'engagement des utilisateurs.

2.1.5.3.2 Résultats expérimentaux : flow et apprentissage

Nous présentons 1 revue et 8 apports expérimentaux permettant de résumer les effets souvent associés au flow en nous focalisant sur les effets sur l'apprentissage avec HMDs ou des serious games. La revue systématique conduite par Perttula *et al.* pointe la faiblesse du niveau de preuve empirique sur l'étude du flow sur l'apprentissage en serious game (Perttula, Kiili, Lindstedt, & Tuomi, 2017). Les résultats identifiés semblent toutefois associer des niveaux élevés de flow à des effets positifs sur l'apprentissage. Ces résultats sont notamment corroborés par ceux de Pavlas *et al.*. Les auteurs suggèrent que le flow impacte positivement l'apprentissage via SG sur la base de leur expérience conduite avec des étudiants en psychologie (N=120) apprenant les propriétés immunitaires de certaines cellules humaines afin de contrer les infections. Ils observent que le flow est un prédicteur de l'apprentissage rapporté par les étudiants (Pavlas, Heyne, Bedwell, Lazzara, & Salas, 2010). Takatalo *et al.* ne trouvent, aucun résultat significativement meilleur pour le flow et l'implication de 91 sujets jouant à des courses de voiture en S3D comparé à 2D (Takatalo, Kawai, Kaistinen, Nyman, & Häkkinen, 2011). Ils concluent à un effet positif très limité de la S3D sur la qualité d'expérience. Gabana *et al.* déclarent que lorsque le flow est haut, l'effet sur la mémoire de travail est positif (Gabana, Tokarchuk, Hannon, & Gunes, 2017). Zhang *et al.* exposent 62 sujets à 3 conditions expérimentales faisant varier le degré d'interactivité pour apprendre l'immunologie en VR. Ils concluent que plus l'interactivité est élevée, plus le flow est élevé (L. Zhang, 2019). Kim *et al.* comparent l'effet du dispositif (VR ou TV) et le degré de rivalité perçue (bas ou haut) avec 129 sujets regardant des matchs de basket. Leurs résultats indiquent qu'avec le même contenu la condition VR conduit à un flow plus élevé qu'en TV (Daehwan Kim & Ko, 2019). Pirker *et al.* comparent le flow entre un laboratoire de physique (apprendre l'électrostatique par exemple) affiché sur HTC-Vive et Samsung Gear VR avec 17 participants (Pirker, Lesjak, Parger, & G tl, 2018). Leurs résultats montrent que le flow est plus faible avec le Samsung Gear VR en raison de sa faible résolution. Kwon montre que le flow est équivalent dans un environnement d'apprentissage VR, lorsque des interactions authentiques ( quivalente au monde réel) ou non (C. Kwon, 2019). Chu *et al.* montrent que 34 participants déclarent un flow élevé en VR et que l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte est efficace (Chu, Humer, & Eckhardt, 2019).

2.1.5.3.3 Synthèse : flow

Le Flow est considéré comme ayant un effet positif sur l'apprentissage (Perttula *et al.*, 2017). Il est souvent un état à déclencher pour les utilisateurs sur lequel comptent les concepteurs des environnements virtuels. Le niveau de défi d'une tâche et d'habileté nécessaire à sa réalisation conditionnent le Flow ressenti par l'utilisateur.   l'image de la Présence, les questionnaires ne sont pas unifiés mais ils représentent le moyen privilégié afin de mesurer le Flow.

2.1.5.4 Conclusion QoE

Nous avons introduit 2 variables de la qualité d'expérience en SG-VR : la Présence et le Flow. Des résultats expérimentaux ont été présentés afin de qualifier le rôle de la qualité d'expérience dans les tâches d'apprentissage avec des outils multimédia. Le plus souvent, les mesures des états mentaux des utilisateurs sont opérées avec des questionnaires. Plusieurs auteurs pointent les biais pouvant conduire des utilisateurs naïfs, par exemple, à évaluer des notions qui leurs sont inconnues telle la présence de façon aléatoire, non fiable, non reproductible. L'approche de la qualité d'expérience à travers des questionnaires apparaît tout de même être un moyen fiable de recueillir des marqueurs de l'état mental, subjectif, des utilisateurs dès lors que les limitations sont connues et ces biais contrôlés au mieux.

La modulation des conditions d'immersion semble avoir un impact sur les performances d'apprentissage. Les études précédentes semblent peu se référer aux limites psycho-physiques des dispositifs employés (VR ou S3D) et leurs éventuelles influences sur la qualité d'expérience des utilisateurs. La présence et le flow délimitent un champ d'expérience utilisateur différent : par leur définition, les états psychologiques, physiologiques et physiques qu'ils permettent d'appréhender à travers le rapport subjectif de l'utilisateur à ceux-ci. Les questionnaires autant que les mesures objectives permettant l'évaluation de la présence et du flow sont redondants entre elles. Ces mesures objectives ne font pas consensus car sont employées dans des paradigmes expérimentaux très différents. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de se concentrer sur les questionnaires pour évaluer la présence et le flow.

2.1.6 Conclusion : Serious Game et Réalité Virtuelle

Nous nous sommes concentrés à restituer l'état des connaissances sur les serious games, la réalité virtuelle et leur combinaison à des fins d'apprentissage. Ces questions cristallisent les affects dans une société techno-scientifique telle que la nôtre. Digitaliser et gamifier les contenus d'apprentissage est une dynamique prégnante. Le transhumanisme (essentiellement sur la base de l'appel à la nouveauté) s'oppose à une défiance des technologies (essentiellement sur la base de l'appel à la terreur). Les croyances et attentes sociétales sur ces dispositifs sont fortes. Nannipieri *et al.* qualifient ces positions de dichotomie entre technophiles et technophobes (Nannipieri *et al.*, 2014). Le jeu vidéo, par extension le SG, et la VR portent tous deux une fonction de réenchantement du monde (Nannipieri, 2011 ; Siegel, 2015). Ces positions ne reposent que peu sur la mesure et la prise en compte des preuves de risques et de bénéfices qui permettraient un usage raisonné de ces dispositifs pour apprendre. Les questions est-ce efficace pour apprendre et y a-t-il des effets secondaires à leur utilisation ne sont que peu considérées pour motiver l'usage de ces dispositifs.

La réalité virtuelle et le serious game, combinés ou non, semblent efficaces pour apprendre. Cependant, le constat récurant est la nécessité de plus d'apports expérimentaux pour mieux qualifier les limites de cette efficacité. Suivant ce constat, nous choisissons de participer à l'effort de création de connaissances empiriques. Cela rejoint les enjeux industriels de cette thèse. Dans cette optique, des expériences portant sur des apprentissages non scientifiques et moins dépendant d'interactions visuo-spatiales sont à privilégier. Cela permettra de mieux qualifier l'efficacité des SG-VR. Se concentrer sur des situations d'apprentissage dans lesquelles ces

dispositifs ne sont pas forcément plus avantageux (pas la nécessité de naviguer dans l'espace, pas la nécessité d'une haute interaction avec l'environnement virtuel) permettra de mieux qualifier leur efficacité. Cela participera à une démarche pragmatique d'évaluation bénéfices/risques de l'usage des SG-VR. C'est à cet effet que nous conduisons une revue sur les preuves d'efficacité d'apprentissage des SG, la VR, les deux combinés et la stéréoscopie en section 4.1. La prochaine partie de l'état de l'art présente le fonctionnement du système visuel humain et comment il est stimulé en HMD particulièrement pour percevoir les informations de profondeur.

2.2 SYSTEME VISUEL HUMAIN, VR ET STEREOSCOPIE

Le principe de la VR est de générer des stimuli afin d'interagir avec les utilisateurs et les immerger dans les environnements virtuels. Bien que l'haptique ait connu de nombreuses avancées ces dernières années, les appareils se focalisent principalement sur la vision : la VR donne à voir aux humains. Ainsi, stimuler le système visuel humain apparaît comme une condition primaire à l'immersion dans ces mondes artificiels (Sherman & Craig, 2018). Nous allons décrire dans ce chapitre le fonctionnement du système visuel humain dans son ensemble puis nous nous concentrons particulièrement sur la perception de la profondeur les indices dans un contexte naturel puis sur la restitution de la profondeur par l'interfaçage avec des HMDs.

2.2.1 Introduction : système visuel humain, VR et S3D

Ce chapitre traite du système visuel humain. Il offre un aperçu des mécanismes permettant à l'humain de capter et traiter l'information visuelle issue de son environnement, qu'il soit naturel ou virtuel. L'interfaçage avec des dispositifs de Réalité Virtuelle étant central dans notre recherche, l'interfaçage des yeux humains via un HMD est spécifiquement traité. Enfin, nous nous concentrons sur l'affichage d'images stéréoscopiques afin de restituer des informations de profondeur en HMD. Plusieurs disciplines sont invoquées afin de traiter ces questions de recherche. Nous interrogeons les bases de données spécifiées en section 2.1.1.

Les trois premiers temps se concentrent sur l'explication des sensations et perceptions humaines en environnement réel. Dans un premier temps, nous présentons le fonctionnement du système visuel humain : son anatomie et le traitement des informations visuelles par le cerveau humain. Dans un second temps, nous décrivons le processus de perception des profondeurs de l'humain (son environnement en trois dimensions) : les indices monoculaires, binoculaires et proprioceptifs. Dans un troisième temps, nous spécifions les interactions entre deux mécanismes du système visuel : l'accommodation et la convergence. Dans un quatrième et cinquième temps, nous nous concentrons sur comment le système visuel humain est stimulé par l'informatique graphique dans un HMD particulièrement puis comment les informations de profondeur sont restituées : les indices monoscopiques et stéréoscopiques. Les 4 questions de recherche posées sont regroupées dans le Tableau 5 ci-après.

Tableau 5 : Questions de recherche (RQ) sur les sensations et perceptions des yeux humains

ID	Question de Recherche
RQ2.1	Comment fonctionne le système visuel humain ?
RQ2.2	Comment l'humain perçoit les informations de profondeur de l'environnement ?
RQ2.3	Quelles sont les interactions entre Accommodation et Vergence ?
RQ2.4	Comment sont restitués les indices de profondeur en HMD pour stimuler les yeux ?

2.2.2 Sensations et perceptions humaines en environnement réel : l'œil en focus

2.2.2.1 Le système visuel humains : fonctionnement

Selon (Classen, 1997), la vision est considérée comme le sens le plus important chez l'humain en Occident à la suite d'une construction sociale et culturelle. Les théories du système visuel sont historiquement très marquées par trois disciplines, selon Rossetti *et al.* : anatomie, psychophysique et neuropsychologie (Rossetti, Pisella, & McIntosh, 2017). Ces théories offrent des paradigmes qui font consensus (Goldstein & Brockmole, 2016 ; Kanski, Chaine, Khammari, Sarda, & Co, 2012 ; Rößing, 2016 ; Schaeffel, 2017). Certains aspects peuvent néanmoins être questionnés, notamment à cause de ces séparations disciplinaires et de dichotomies qui doivent être aujourd'hui nuancés au regard d'apports empiriques variés. Ainsi, nous restituons ci-après une partie de ces connaissances en les combinant en un aperçu.

2.2.2.1.1 Anatomie et physiologie du système visuel humain

Voir est un processus actif d'interaction de tout instant avec l'environnement. Ce processus est régi par le système visuel qui se compose chez l'homme des yeux et des muscles oculomoteurs. L'ensemble assure l'acheminement de l'information lumineuse vers le cerveau. La perception des informations visuelles commence lorsque la lumière se reflétant sur les objets est captée par les yeux. Ce sont ces stimuli qui activent les mécanismes de la vision. Il semblerait que les premiers yeux soient apparus chez les animaux pendant le Cambrien (-541 à -485,4 millions d'années). Pour l'Homme moderne, l'on présente couramment douze composantes de l'œil (voir Figure 6). Nous n'en détaillons qu'une partie.

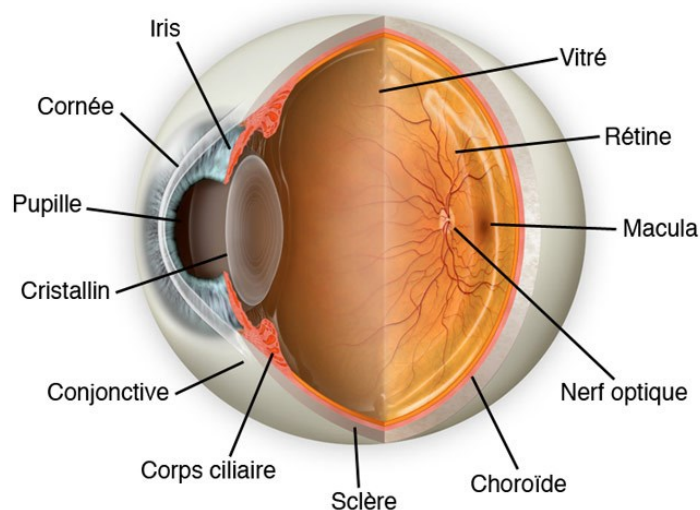


Figure 6 : Schéma anatomie de l'œil humain, © www.institutdeloeil.com (dernière consultation : 14/11/2019)

La Cornée est la partie transparente située en avant de l'œil dont la fonction est de le protéger. Elle se trouve devant l'Iris (la partie colorée). La lumière pénètre dans l'œil à travers la Pupille. Selon les conditions lumineuses, le réflexe pupillaire règle le diamètre de la pupille et ainsi l'intensité de lumière entrant, comme le diaphragme d'un appareil photo. La lumière passant par la Pupille traverse le Cristallin. Le Cristallin change de forme telle une lentille souple selon ce qui est observé et redirige la lumière vers la Rétine. Neurorécepteur de l'œil, la Rétine est

notamment composée de photorécepteurs (cônes et bâtonnets) permettant de distinguer les couleurs et la luminosité (Pérez, Saiz, & Verdú, 2010). La Fovéa, située au centre de la Macula, est une zone particulière de la Rétine concentrant une très haute densité de ces récepteurs : l'acuité visuelle y est maximale. Enfin, le Nerf Optique, regroupant l'ensemble des prolongements des photorécepteurs transmet les informations visuelles traitées (au sens cognitif) par le cerveau. À ce stade, la lumière est devenue une information électrique (transduction). Elle est prête à se diffuser à travers le système nerveux jusqu'aux aires dédiées du cerveau. Des muscles s'ajoutent à l'organe de la vision. On en dénombre sept. Ils sont appelés muscles oculomoteurs (voir Figure 7).

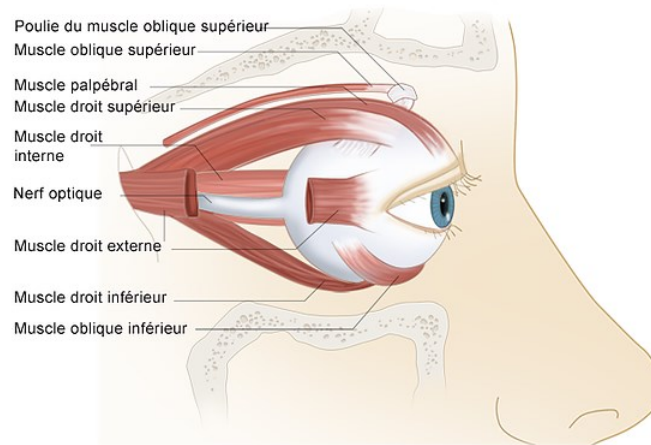


Figure 7 : Schéma des muscles de l'œil humain (vue latérale droite), © www.fr.evebrainpedia.com (dernière consultation 20/11/2017)

Ils assurent la mobilité de l'œil sur trois degrés de liberté : rotation horizontale, verticale et torsion (voir Figure 8). Nous établissons dans la section 2.2.2.2 que ces muscles ont une influence sur les perceptions.

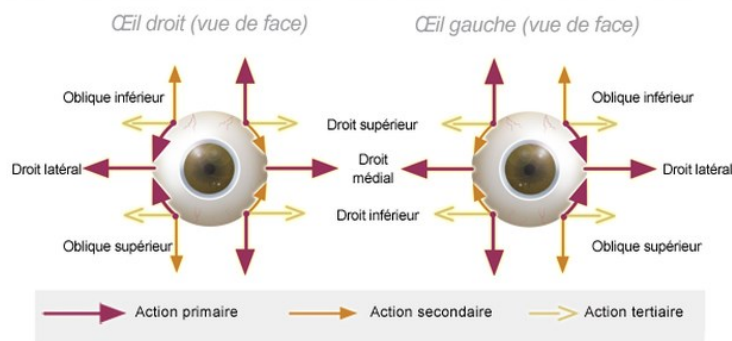


Figure 8 : Action des muscles oculomoteurs, œil au repos, © www.fr.evebrainpedia.com (dernière consultation 20/11/2017)

2.2.2.1.2 Traitement des informations visuelles chez l'humain : aperçu

Les yeux et les muscles oculomoteurs font partie d'un ensemble appelé le système visuel. En effet, comme présenté précédemment, une fois la lumière transduite en informations électriques, le nerf optique les transmet au cerveau pour la suite du traitement (voir Figure 9). L'image de l'objet sur lequel la lumière se reflète est captée à l'envers sur la rétine. Chaque œil (le gauche et le droit) a un

champ visuel dédié dit « monoculaire ». Ces deux champs se chevauchent en un champ dit « binoculaire ». Les nerfs optiques se croisent au niveau d'une structure appelée le Chiasme optique. Ainsi, l'œil droit est connecté à l'hémisphère gauche et l'œil gauche à l'hémisphère droit. La connexion du nerf optique au cerveau se fait dans les Corps géniculés latéraux, De là, les informations électriques sont transmises dans le cortex visuel en commençant par l'aire V1, anatomiquement dans le lobe occipital situé à l'arrière de la tête. Les traitements, plus ou moins spécialisés, de chaque sous-région entrent en jeu (Troncoso, Macknik, & Martinez-Conde, 2011).

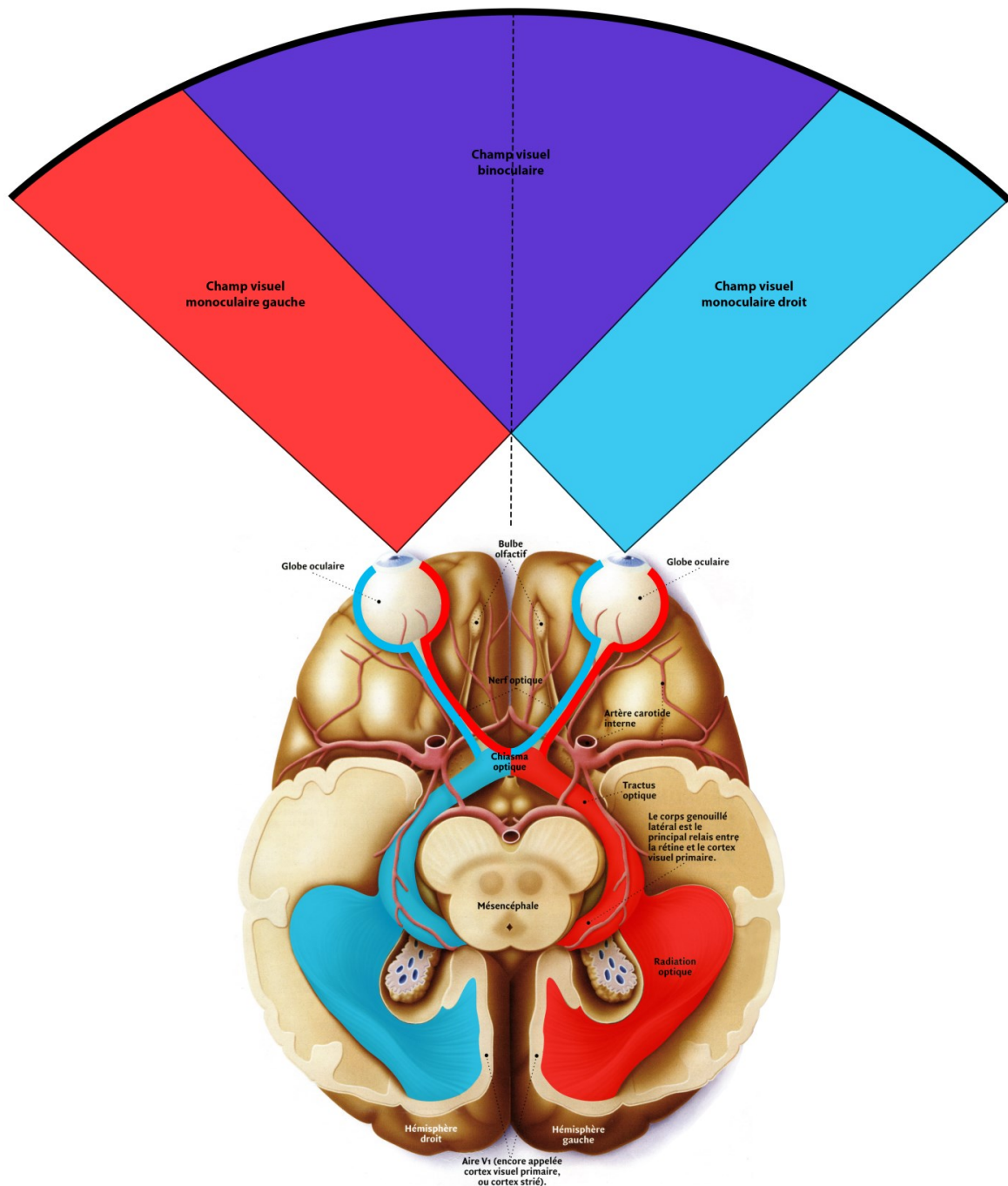


Figure 9 : Système visuel humain et ses voies, réinterprété de © Science & Vie junior Hors-Série n° 51 L'œil et le cerveau - 01/01/2003

Avec les avancées de l'imagerie cérébrale, plusieurs sous-régions impliquées dans la vision ont été cartographiées. Les cinq régions principales sont situées dans le lobe occipital (voir Figure 10). Elles sont identifiables notamment grâce à leur structure cellulaire et des input/output uniques. Le signal arrive en premier lieu dans V1. Cette sous-région traite et distribue le signal en trois informations distinctes : couleur, forme et mouvement (Kolb, Whishaw, & Teskey, 2016). V2 affine le traitement et la répartition vers les régions plus spécialisées en conservant la discrimination en trois informations. V1 et V2 ont donc un rôle de traitement et d'organisation du signal. V3 est spécialisée dans le traitement des formes : orientation, angles. V3a traite plus spécifiquement les formes dynamiques : association avec le mouvement et la direction. V4 est spécialisée dans le traitement des couleurs. Enfin, V5 est spécialisée dans le traitement des mouvements.

Par ailleurs, Kolb et Whishaw rappellent (p. 299) que le traitement des informations visuelles ne se restreint pas au cortex occipital. Ainsi, le lobe pariétal est spécialisé dans le mouvement des yeux (lateral intraparietal area, LIP) ou encore le contrôle visuel pour saisir des objets (anterior intraparietal area, AIP). Les études de Grill-Spector et Malach utilisant les Random Dot Stereograms ont permis d'indiquer que le traitement des informations de profondeur est assurée par les aires V1, V2, V3, VP, V3a, et V5 (hMT+) (Grill-Spector & Malach, 2004). V6 serait spécialisée dans le traitement du mouvement de soi et d'une partie des informations de profondeur (Cardin, 2011). Dans le cadre de nos problématiques, l'identification de ces régions (en général autant que pendant l'immersion en VR) pourrait nous informer sur la pertinence d'utiliser la stéréoscopie selon les actions à entreprendre par l'utilisateur dans un Environnement Virtuel et les stimuli visuels générés. C'est particulièrement le cas lors de tâches d'apprentissage pour lesquelles les ressources allouées par le cerveau (mémoire de travail) doivent être optimisées.

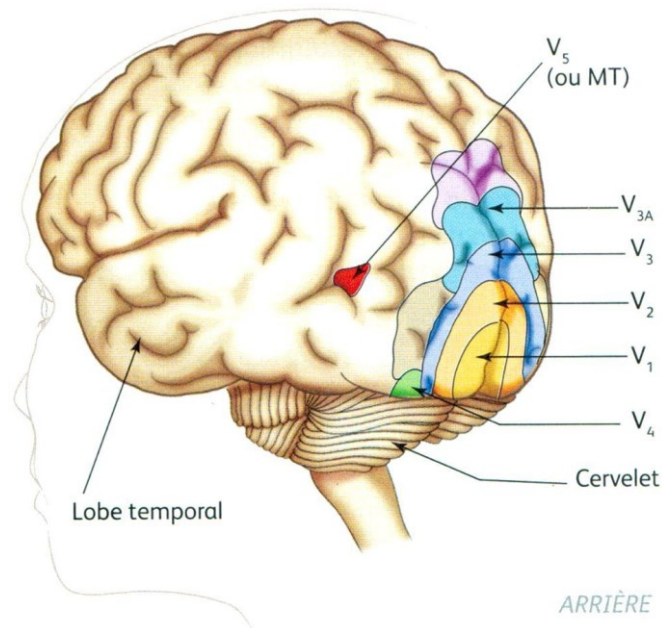


Figure 10 : Cartographie de l'aire de la vision, © tpeillusion.webnode.fr

Toutes ces régions sont en interaction et contribuent à la perception visuelle. Le traitement du signal peut ainsi s'effectuer collectivement ou dans une sous-région spécialisée. En effet, comme énoncé par Kolb et Whishaw, les systèmes du cerveau, y compris le système visuel, sont organisés hiérarchiquement et parallèlement (Kolb *et al.*, 2016).

Entre le moment où la lumière est sur la rétine et celui où le cerveau permet de reconnaître des objets, il se passerait 150 millisecondes (Thorpe, Fize, & Marlot, 1996). King propose un diagramme (voir Figure 11) de la durée en millisecondes à partir du temps $t = 0$ ms, lorsque l'image est sur la rétine, jusqu'aux différentes régions du cerveau traitant le signal (King, 2013).

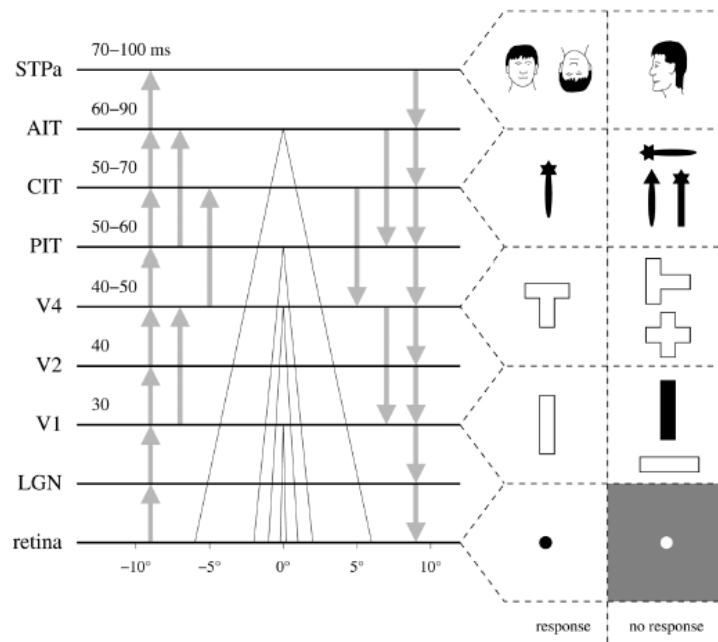


Figure 11 : Temps de traitement de l'information visuelle selon (King, 2013) pour images statiques : le centre des triangles montre la taille de la zone visuelle gérée par les neurones. Cela est corrélé au degré de complexité des scènes visuelles traitées dans chaque région., © Paul King - www.quora.com

Ce temps de traitement est à corrélérer avec l'action entreprise par l'observateur et si l'image (l'objet ou la personne) est en mouvement ou non. Ainsi, les temps sont donnés en Figure 11 à titre indicatif pour des images statiques. Lamme annonce que 80 ms après un stimulus visuel (ex : présentation d'une image) toutes les régions jusqu'au cortex moteur sont activées (Lamme, 2004) donc les yeux bougent selon ce stimulus et les stratégies d'action. Masquelier *et al.* rapportent des temps de reconnaissance des objets de 100 ms pour les traitements les plus simples (random-test motion en tant que stimuli) et jusqu'à 400 ms pour les images plus complexes (Masquelier, Albantakis, & Deco, 2011). Notons que les yeux fonctionnent par cycles de saccades (Leigh & Zee, 2015) et de fixation appelés cycles oculomoteurs (Boi, Poletti, Victor, & Rucci, 2017) donc que le traitement des informations visuelles une fois parvenues au cortex moteur vient conditionner ces cycles dans une temporalité décrite ci-avant.

En HMD, la perception visuelle est probablement à ce jour le système sensoriel le plus mobilisé. Pour ce faire, le dispositif doit afficher des stimuli permettant l'activation des mécanismes neurophysiologiques décrits ci-avant. Un type d'information traité par le système visuel nous

intéresse particulièrement dans le cadre des recherches de cette thèse : la profondeur. Nous décrivons cela dans la prochaine section.

2.2.2.2 Perceptions de la profondeur

2.2.2.2.1 Contexte

Deux types d'indices permettent de percevoir la profondeur (voir Figure 12) : les indices visuels et proprioceptifs (ou oculomoteurs) (Goldstein & Brockmole, 2016 ; Rößing, 2016 ; Stidwill & Fletcher, 2011).

- **Les indices visuels** peuvent être perçus avec un seul œil ou avec les deux yeux, on parle respectivement d'indices monoculaires ou binoculaires. Ils peuvent être statiques (lumières et ombres, interposition, taille relative, gradient de texture et perspectives) ou dynamiques (les parallaxes de mouvements). Les visions monoculaire et binoculaire peuvent être décalées sous certaines conditions (I. P. Howard & Rogers, 1996). Pearson et Clifford expliquent qu'en cas de conflits, le cerveau hiérarchise l'information captée (via un mécanisme général), permettant d'obtenir une perception cohérente (J. Pearson & Clifford, 2005) : la dimension probabiliste du cerveau humain se retrouve en cela. Cependant, ce mécanisme peut être une cause de fatigue visuelle.
- **La proprioception** est le sens de la position et du mouvement dans l'espace des membres d'un individu. Nous nous concentrons sur la position et le mouvement des yeux, c'est à dire la proprioception impliquée dans les perceptions visuelles. Deux mécanismes sont plus particulièrement pertinents dans notre contexte : l'accommodation et la vergence.

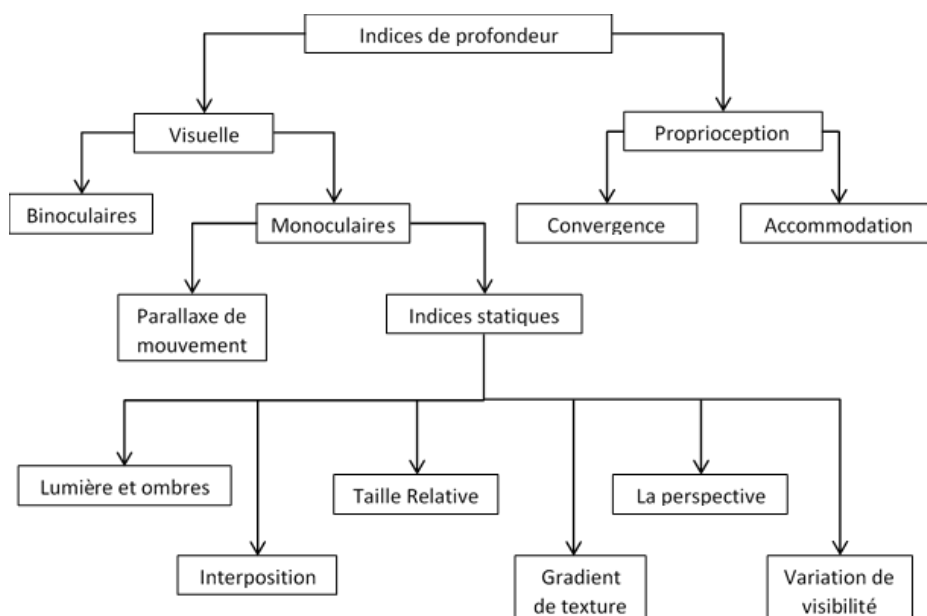


Figure 12 : Classification des indices pour la perception de la profondeur d'après Fuchs (2016, p. 44)

En milieu naturel, les indices visuels et proprioceptifs sont combinés (Welchman, Deubelius, Conrad, Bühlhoff, & Kourtzi, 2005). Le cerveau en déduit ce que Landy *et al.* appellent une « *carte de profondeur* » d'une scène permettant à l'humain d'appréhender l'espace et les objets dans son environnement pour agir (Landy, Maloney, Johnston, & Young, 1995). Les

informations déduites de la stéréopsie : la fusion des deux images obtenue par chaque œil présentant une disparité, se révèle particulièrement efficace pour discriminer la profondeur (Schaeffel, 2017). Selon la distance de l'objet, certains indices sont plus prégnants que d'autres (voir Figure 13).

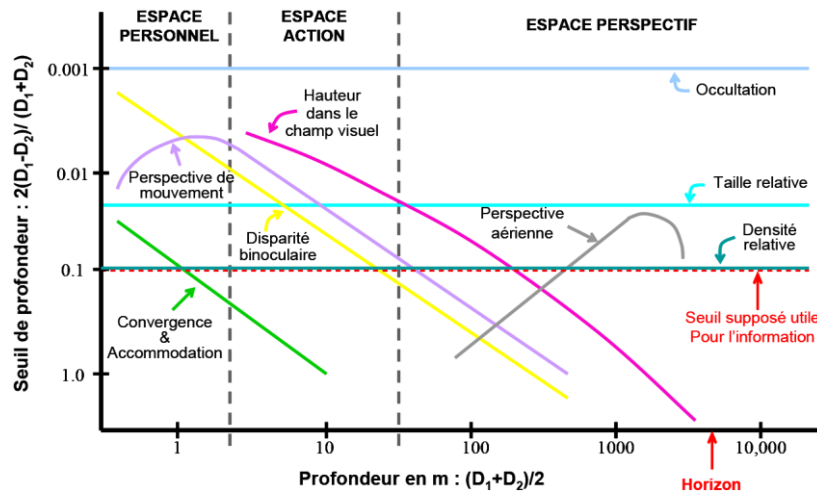


Figure 13 : Schéma efficacité (en seuil de profondeur) des neuf principaux indices de perception de la profondeur selon la distance par rapport à l'observateur, d'après (Cutting & Vishton, 1995), réinterprété par (Devisme, 2008)

Une partie de la population serait « stéréo-aveugle » : avec une perception binoculaire de la profondeur absente ou immesurable. Cette proportion varie en fonction des populations testées et des conditions de mesure de 2,2% à 32% (Lambooy, IJsselsteijn, Fortuin, & Heynderickx, 2009 ; Bosten *et al.*, 2015 ; Hess, To, Zhou, Wang, & Cooperstock, 2015). Déterminer les interactions neuronales permettant de percevoir les indices de profondeur ainsi que les comportements visuels pour maintenir une perception interprétable par le cerveau font toujours l'objet de travaux (A. J. Parker, 2016).

En VR, il s'agit donc de proposer des écrans ainsi que des informations graphiques capables de restituer ces indices. Nous détaillons ci-après ces indices en environnement naturel.

2.2.2.2 Indices monoculaires

2.2.2.2.1 Lumières et ombres

L'intensité lumineuse, les ombres, permettent d'apporter des informations de localisation. Leroy explique qu'« *en se réfléchissant sur les surfaces, la lumière va influencer la perception des orientations des plans et la distance entre ceux-ci et la source de lumière* » (Leroy, 2016). Des sphères sur un échiquier par exemple (voir Figure 14) sur lequel une source de lumière provoquerait des ombres portées des sphères sur l'échiquier. Dans l'illustration ci-dessous, en (a) les sphères sont perçues comme posées ou au contraire comme lévitant, mais sans certitude, sur l'échiquier. En (b) les ombres sur l'échiquier nous renseignent sur la distance des sphères par rapport à l'échiquier sans incertitude.

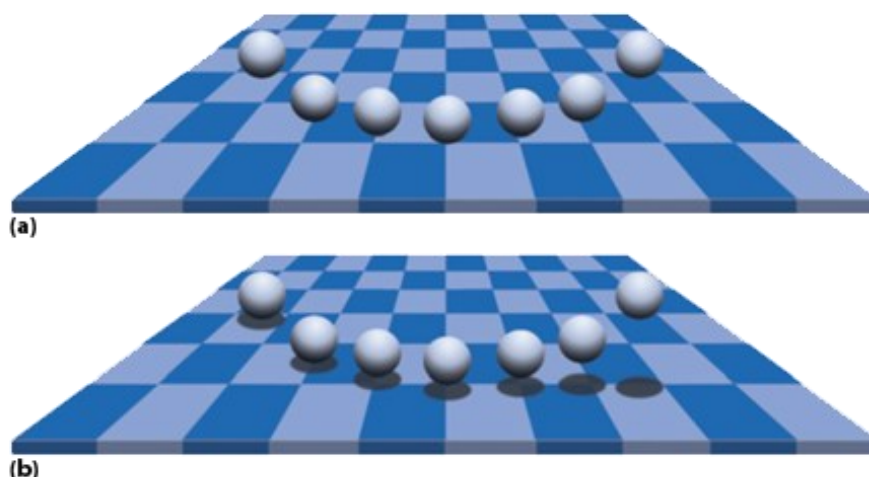


Figure 14 : Lumières et ombres, sphères sur échiquier, extrait de Pascal Mamassian et Goldstein et Brockmole (2016, p.231)

2.2.2.2.2 Interposition

L'interposition apparaît lorsqu'un objet cache partiellement le contour d'un autre : voir Figure 14. L'objet cachant est perçu comme devant celui caché (Chapanis & McCleary, 1953). Ce dernier est perçu derrière. Dans notre exemple en Figure 15, l'ellipse apparaît plus proche que le rectangle qu'elle cache en partie. Selon les formes et le point de jonction des objets, la « *puissance* » de cet indice en tant qu'information de profondeur peut varier (ibid., p.131).

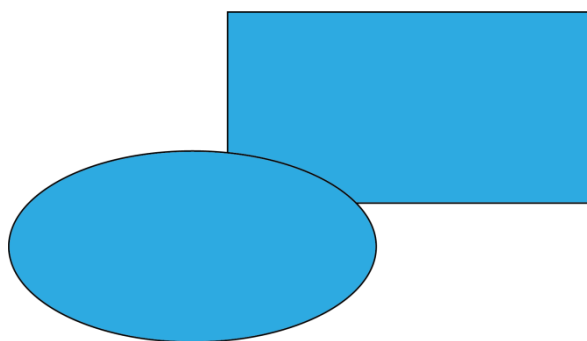


Figure 15 : Interposition, l'ellipse est perçue devant le rectangle donc plus proche

2.2.2.2.3 Taille relative

Lorsque deux objets ont une taille similaire, le plus éloigné prend moins de place dans notre champ visuel, il a une image rétinienne plus petite. Cette « habitude » du système visuel nous conduit à percevoir les objets plus petits comme étant plus éloignés (Ittelson, 1951). Dans notre exemple, en Figure 16, la taille des pommes et la hauteur à laquelle elles sont placées les unes par rapport aux autres sont interprétées comme des indices de distance : la pomme de gauche est plus proche que la pomme de droite.



Figure 16 : Taille relative, la pomme la plus petite est perçue comme la plus éloignée

2.2.2.2.2.4 Gradient de texture

Des éléments également espacés apparaissent plus tassés à mesure que la distance augmente, ainsi plus la texture d'un élément est fine plus le système visuel humain interprète l'élément comme proche (Bajcsy & Lieberman, 1976). Dans notre exemple, en Figure 17, le grain des joints entre les pavés est perçu comme se resserrant de manière régulière. Cette information n'est pas interprétée comme une indication de taille mais de distance : la texture moins nette fait percevoir les joints plus tassés, donc plus éloignés.



Figure 17 : Lorsque les éléments sont éloignés, la texture est moins nette et les joints sont perçus comme se rapprochant, d'après Leroy (2016, p. 16)

2.2.2.2.2.5 La perspective

Deux types de perspectives ont été identifiés (voir Figure 18) : la perspective cavalière et la perspective artistique. Dans le dessin industriel ou les représentations mathématiques, nous

employons souvent la première. Dans les arts picturaux, nous employons depuis des siècles la seconde. La Figure 18 schématise la différence entre ces deux types de perspectives dans le cas d'un schéma de cube : la perspective cavalière présente les arrêtes du cube, parallèles les unes aux autres tandis que la perspective artistique présente les arrêtes convergentes vers un point de fuite. Selon Fuchs, il s'agit de l'indice « *le plus efficace pour percevoir le monde en relief sur un écran monoscopique* » (Fuchs, 2016). L'image présentée en Figure 19 illustre la notion de point de fuite et la perception de la perspective en tant qu'indice de profondeur et son effet sur la taille perçue d'un objet.

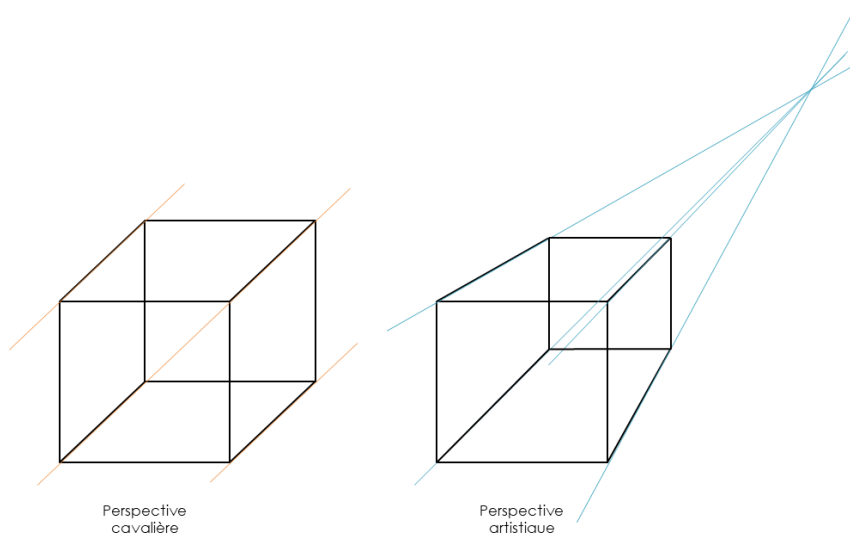


Figure 18 : Perspective cavalière, arrêtes du cube dans l'axe parallèles ; Perspective artistique, arrêtes du cube vers point de fuite

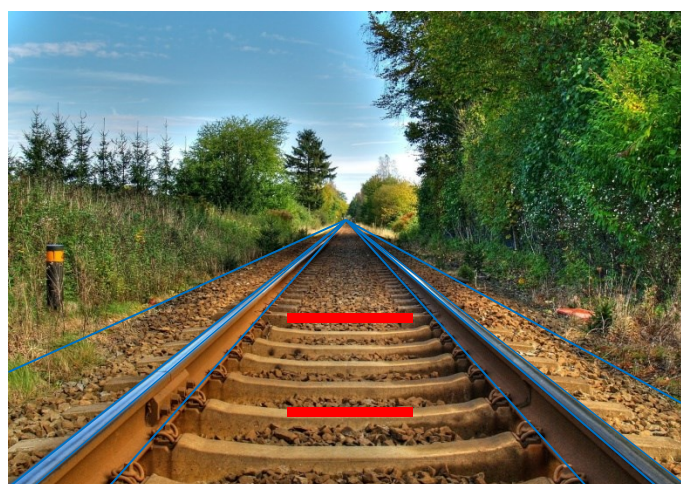


Figure 19 : Illusion de Ponzo, la ligne rouge la plus proche est perçue moins longue que la seconde & points se rejoignant au centre de l'image appuyé par les lignes bleue

2.2.2.2.2.6 Variation de visibilité (perspective atmosphérique)

Dans une scène extérieure, une variabilité de la visibilité se manifeste lorsqu'un objet distant apparaît moins net qu'un objet plus proche. L'objet le plus éloigné peut également être perçu avec une légère teinte bleue. Un objet éloigné est plus ou moins occulté par la présence de particules d'eau ou de pollution en suspension dans l'air. Cet indice se retrouve lorsqu'on porte

son regard vers l'horizon donc assez éloigné (voir Figure 20). Mais en cas de brouillard, il se manifeste beaucoup plus proche de nous.



Figure 20 : Démonstration de la Variation de visibilité avec des Montagnes en Alaska.
Les gouttes d'eau rendent la montagne du centre de l'image moins nette et bleutée

2.2.2.2.7 Parallaxes de mouvement, indice dynamique

Nous venons de traiter des indices monoculaires statiques. Nous traitons maintenant des indices monoculaires dynamiques. Lorsque les humains bougent, les objets proches se déplacent plus vite sur la rétine que les objets éloignés de celle-ci. Ce phénomène conduit à percevoir l'indice de parallaxe de mouvement (Rogers & Graham, 1979). Il est notamment très utilisé dans les dessins animés et dans les jeux vidéo pour créer une impression de profondeur (voir Figure 21). Le système visuel déduit donc des informations de distance des objets selon cette différence de vitesse des images sur notre rétine.

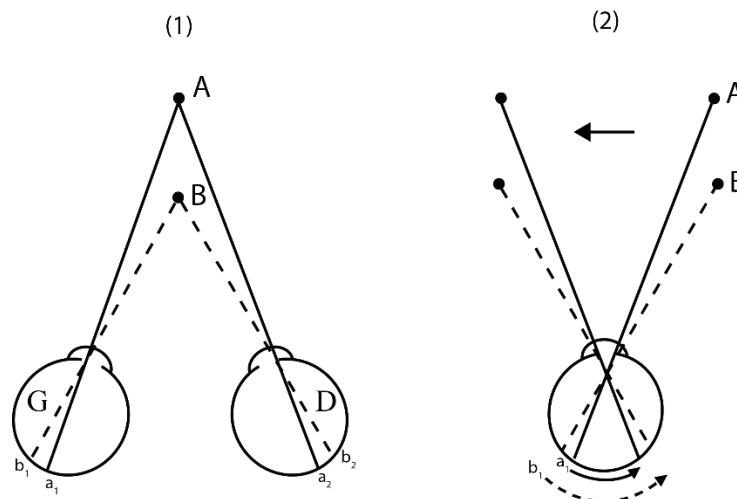


Figure 21 : Parallaxe de mouvement. (1) Mouvement de l'observateur : l'image rétinienne de l'objet A, le plus éloigné de l'observateur, parcourt une plus petite distance que l'image rétinienne de l'objet B, le plus proche de l'observateur. Ce déplacement sur la rétine s'effectue plus vite pour les objets proches que les objets éloignés. (2) Mouvement de l'objet : mécanisme similaire sur l'interprétation par le système visuel mais cela est due au mouvement de l'objet

2.2.2.2.3 Indices binoculaires

Ce sont les indices perceptibles uniquement avec deux yeux (Blake & Wilson, 2011). Du fait de l'espacement horizontal des yeux humains, chaque œil capte deux images légèrement différentes d'un même point de fixation. La distance inter-pupillaire est en moyenne 65 mm (Anses, 2014), pouvant varier selon les pays (Dodgson, 2004). Cette différence interprétée par le cerveau est la **disparité binoculaire** ou **disparité rétinienne**. C'est la **stéréopsie**, c'est à dire la fusion de ces deux images légèrement différentes par le système visuel, qui apporte une information de profondeur (I. P. Howard & Rogers, 1996). On peut en prendre facilement conscience en tenant sa main devant soi puis en fermant chaque œil alternativement.

Ainsi, l'utilisation de deux yeux plutôt qu'un seul rend les humains globalement plus efficaces pour agir dans leur environnement (R. K. Jones & Lee, 1981). L'intérêt est particulièrement perceptible dans l'environnement proche, notamment pour la coordination yeux-mains (Stidwill & Fletcher, 2011). Cette particularité tient au fait que le mécanisme implique la convergence des deux yeux vers un même objet, **le point de fusion**. La stéréopsie devient ainsi rapidement inefficace pour les objets lointains, Rößing établit que la limite est comprise entre 5 et 10 mètres (Rößing, 2016).

En d'autres termes, la stéréopsie n'est possible que pour un nombre limité de positions dans l'espace. C'est à dire que le cerveau ne sera capable de considérer le point de convergence comme unique malgré la disparité binoculaire, que si la distance respecte certaines conditions. Cet ensemble de **points fusionnables** peut être matérialisé par le champ de vision horizontal binoculaire de l'humain est de 120° . L'**horoptère**, également appelé **Cercle de Vieth-Müller** (Figure 22). Il a été défini mathématiquement par Vieth et Müller : il correspond à un ensemble d'emplacements sur une ligne de base dans l'espace à partir de laquelle la profondeur relative est jugée et sur laquelle la fusion sans diplopie (vision double) est possible (Patterson, 2014). La **disparité rétinienne** correspond à la différence entre l'angle formé sur la rétine de chaque œil : $\alpha = \alpha_G - \alpha_D$. Si les yeux convergent sur un autre point, l'horoptère variera.

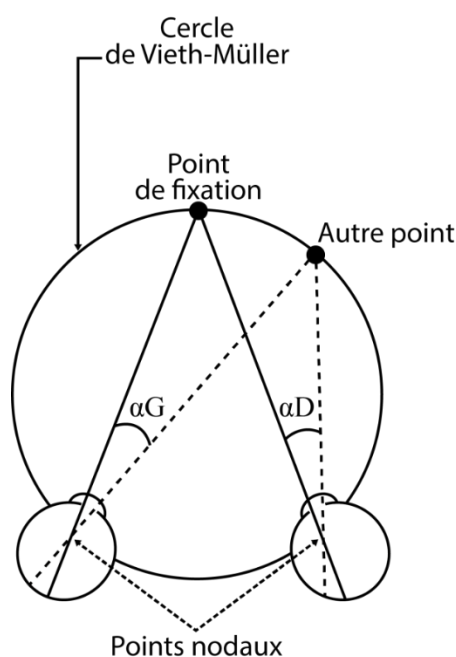


Figure 22 : Cercle de Vieth-Müller, librement adapté à partir de Devisme (2008, p.32)

Ce modèle théorique n'est cependant pas entièrement confirmé par les apports empiriques, notamment par les travaux de Julesz et Sperling (Julesz, 2006). En effet, l'**horoptère expérimental** s'écarte du cercle de Vieth et Müller théorique, comme illustré en Figure 23. Les auteurs ont également constaté que les images sont fusionnables même si elles ne se trouvent pas précisément sur l'horoptère. Il s'agit ainsi plutôt d'une aire, appelée Aire de Panum, plus ou moins symétrique par rapport à l'horoptère selon les individus (Mitchell, 1966). Dans cette aire, les points sont perçus sans diplopie, au-delà, l'observateur percevra double. En Figure 23, l'aire de Panum est représentée en violet.

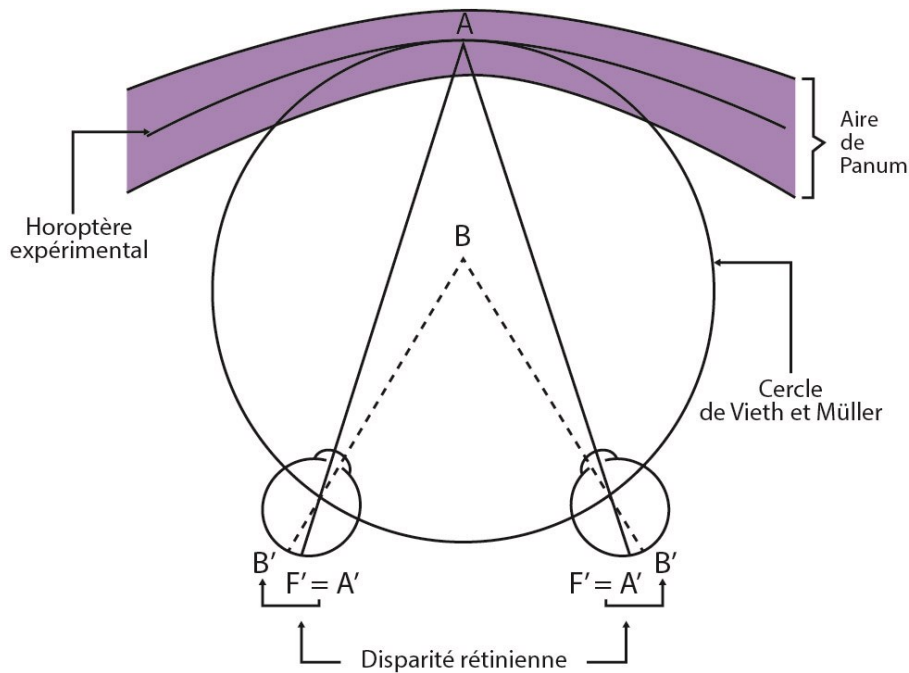


Figure 23 : Aire de Panum, représentation selon Neveu (2008, p.13).

F' : fovéas de chaque œil. Les yeux convergent sur l'objet A, l'image rétinienne. L'objet est vu correctement.
 A' : se trouve sur la fovéa de chaque œil. L'objet B est en dehors de l'aire de Panum. L'objet est vu double.

Lambooij *et al.* compilent de précédentes études pour établir que [notre traduction] (Lambooij *et al.*, 2009) :

« les limites de la zone de fusion de Panum ne sont pas constantes sur la rétine, mais s'étendent à l'excentricité croissante de la fovéa. Sur la fovéa, la fusion sensorielle est limitée à une disparité rétinienne de $0,1^\circ$, avec une excentricité de 6° à une disparité rétinienne de $0,33^\circ$ et à 12° d'excentricité à une disparité rétinienne de $0,66^\circ$. »

Schor *et al.* ont montré que la variation des informations de profondeur fusionnables est plus élevée avec des fréquences spatiales élevée et réduit l'aire de Panum (Schor, Wood, & Ogawa, 1984).

2.2.2.2.4 Les indices proprioceptifs

La proprioception est le sens de la position et du mouvement dans l'espace des membres d'un individu (Han, Waddington, Adams, Anson, & Liu, 2016 ; Stillman, 2002). La proprioception a particulièrement été étudiée dans les expériences sur les pratiques des sports et les blessures. La question du mouvement et de la localisation des membres peut notamment trouver un intérêt dans le cadre de gestes à apprendre. Par exemple, les gestes particuliers à des procédés artisanaux ou industriels. Lorsque l'humain se trouve dans un EV en VR, l'absence de feedbacks proposés à l'utilisateur afin d'alimenter sa proprioception peut être un obstacle. Cela se relève notamment lors de tâches impliquant d'interagir avec des objets : saisir, bouger l'objet, le lâcher (Mine, Brooks, & Sequin, 1997), ou lorsque que l'utilisateur est amené à marcher en VR (Usoh *et al.*, 1999) ; les feedbacks visuels sont alors insuffisants s'ils sont seuls. Dans notre cas particulier, nous nous concentrons sur la proprioception impliquée dans les perceptions visuelles et donc la position et le mouvement des yeux. La proprioception entre en action pour les yeux et

leurs muscles selon ce que l'humain regarde (voir section 1.1.2.1.1) (Steinbach, 1987) notamment afin de localiser les objets dans l'espace (Gauthier, Nommay, & Vercher, 1990). Nous nous sommes particulièrement intéressés à 2 mécanismes : la vergence et l'accommodation.

2.2.2.2.4.1 Vergence

La vergence est le mécanisme permettant à nos yeux de se mouvoir dans leur orbite afin de fixer un même point (Millodot, 2017). Une image des objets centrée sur chaque rétine est ainsi obtenue. Les axes optiques sont orientés vers l'objet regardé (voir Figure 24). Les muscles extérieurs appliquent le mouvement (voir Figure 7 et 8). La vergence comprend quatre mouvements distincts (Maddox), dont la convergence et le mouvement inverse : la divergence (I. P. Howard & Rogers, 1996). Ce mouvement en particulier se produit simultanément pour les deux yeux.

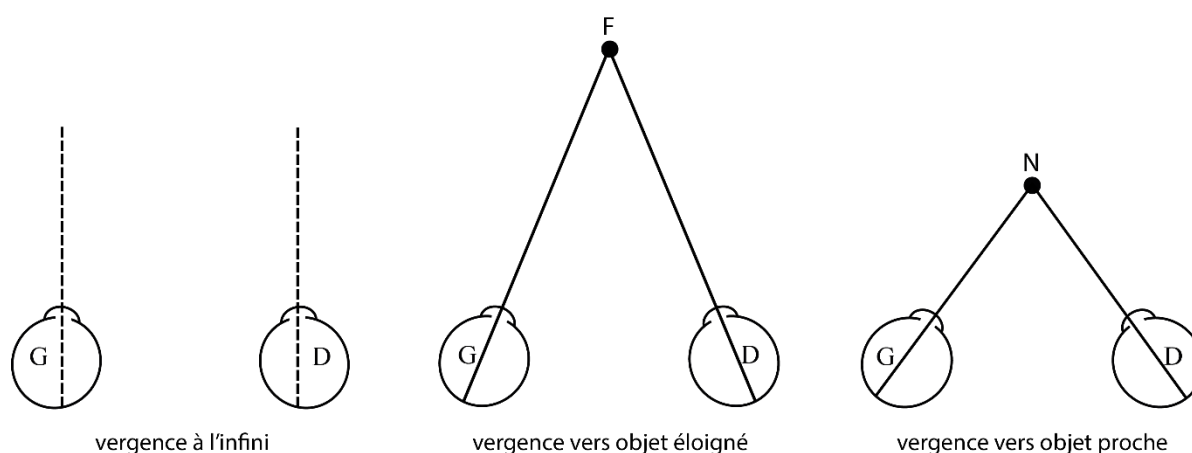


Figure 24 : Vergence, différents mouvements pour aligner les axes optiques selon la distance de l'objet regardé

Ainsi, la convergence permet notamment de localiser un objet dans l'espace avec une grande précision pour le système visuel (Lie, 1965). Un individu louchant volontairement fait converger excessivement et consciemment ses yeux sur un objet / un point extrêmement proche de lui. Selon Heron *et al.*, entre 16 et 48 ans, la vergence se maintient aux mêmes performances (Heron, Charman, & Schor, 2001). Les modèles décrivant le fonctionnement des muscles et des neurones moteurs impliqués dans la convergence et la divergence sont encore en discussion (Y.-F. Chen, Lee, Chen, Semmlow, & Alvarez, 2010) et semblent distincts (Erkelens & Bobier, 2017). Gibaldi et Banks montrent que le système visuel humain incorpore des régularités statistiques dans l'environnement visuel pour permettre des mouvements binoculaires efficaces : ces mouvements sont statistiquement liés aux propriétés 3D des scènes naturelles (Gibaldi & Banks, 2019). Les mouvements binoculaires maximisent la probabilité d'une fixation précise lorsque les yeux se déplacent d'une position à une autre dans des scènes 3D. Cela appuie la propriété probabiliste du cerveau humain et de son système de perception visuel.

2.2.2.2.4.2 Accommodation

L'accommodation est le mécanisme, réflexe involontaire, permettant de faire la netteté sur un objet fixé (Millodot, 2017). Si un objet proche est fixé, les muscles ciliaires se contractent (Glasser, 2006) et déforment le cristallin, i.e. sa courbure, permettant ainsi de réfracter la lumière réfléctée par un objet nettement sur la fovéa (Burd, Judge, & Flavell, 1999). Il en résulte

une modification de la puissance dioptrique de chaque œil. On métaphorise souvent ce fonctionnement par l'action de tourner une bague d'appareil photo afin de varier la distance et modifier le plan de netteté. L'accommodation peut varier d'un œil à l'autre (Marran & Schor, 2000). En fixant un objet proche, le cristallin sera moins bombé que lorsqu'il fixe un objet éloigné (voir Figure 25).

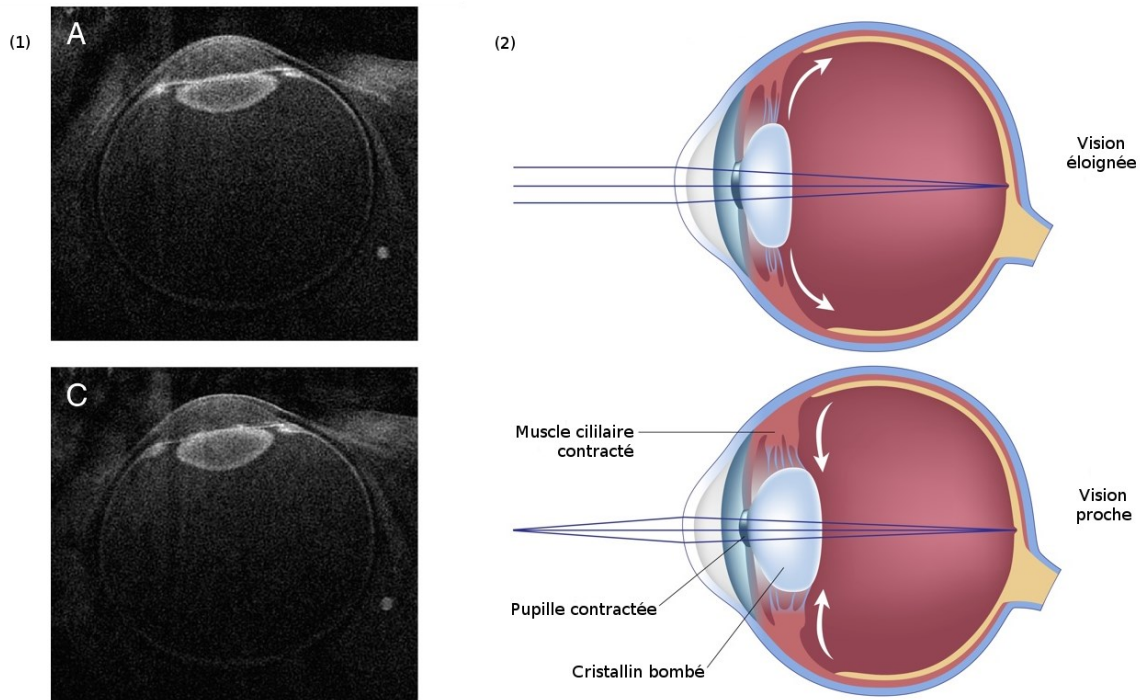


Figure 25 : Mécanisme d'accommodation, objet éloigné et objet proche

(1) D'après Kasthurirangan *et al.*, IRM œil en A accommodation sur objet éloigné, en C sur objet proche avec un sujet de 27 ans (Kasthurirangan, 2011). (2) Schéma illustrant le mécanisme, librement interprété de l'anglais, © www.charllaas.com

On discerne le point le plus proche et le point le plus éloigné auquel il est possible pour un individu de voir net. Ceux-ci vont varier avec l'âge, faisant ainsi varier l'amplitude d'accommodation. À partir de 40 ans, l'humain commence généralement à présenter une presbytie, c'est-à-dire une difficulté à accommoder sur un objet proche (Charman, 2008). Nous présentons ci-après le PPA ou Punctum Proximum d'Accommodation ainsi que l'amplitude, deux variables caractéristiques de la proprioception.

Punctum Proximum d'Accommodation (PPA) : point le plus proche

Le Punctum Proximum d'Accommodation (appelé « near point » en anglais) correspond à la distance minimale à laquelle un objet est vu net par accommodation. Il est souvent annoncé comme se trouvant en moyenne à 25 cm. Or, Fuchs rappelle que cette distance est atteinte à 40 ans (Fuchs, 2016). Cela est à peu près en concordance avec Goldstein et Brockmole (voir Figure 26) : 14 cm à 30 ans, 22 cm à 40 ans et 100 cm à 60 ans (Goldstein & Brockmole, 2016). Tous ces auteurs ne précisent pas l'origine de ces chiffres. En France, Bonnac et Meslin relèvent entre 8 - 17 cm de 15 à 30 ans (Bonnac & Meslin, 2006). Nous nous référons ici à des valeurs en cm. Cependant, la distance d'accommodation s'exprime en dioptrie (I. P. Howard & Rogers, 1996), notée δ (delta bas de casse) ou parfois D (d capital). Ainsi, obtenir une longueur (ici en cm) implique un calcul d'optique.

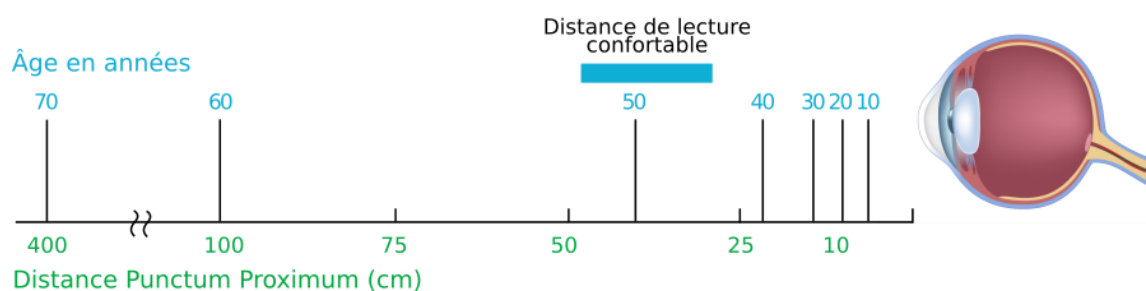


Figure 26 : Distance du point le plus proche auquel un humain peut accommoder selon son âge d'après Goldstein et Brockmole, librement traduit et adapté (Goldstein & Brockmole, 2016)

Plus l'humain est jeune, plus le PPA sera court. À l'inverse, l'âge augmentant, cette distance s'allonge. En effet, d'après Heron *et al.*, entre 16 et 40 ans, l'accommodation se réduit d'un facteur cinq (Heron *et al.*, 2001).

Amplitude d'accommodation

L'amplitude d'accommodation désigne la différence de réfraction de l'œil entre son état relaxé et d'accommodation complète : soit la différence entre le PPA et le PR (Scheiman & Wick, 2014). Ces dernières années, la formule d'Hofstetter a été utilisée pour établir l'amplitude d'accommodation à attendre selon l'âge d'un individu (Benjamin, 2006), bien que des écarts significatifs aient été mesurés (Hashemi *et al.*, 2017 ; 2016).

2.2.2.3 Interactions entre Accommodation et Vergence

2.2.2.3.1 Principe de corrélation

L'interaction entre Accommodation (dont l'inverse de la distance entre le cristallin et le plan de vision sans diplopie est exprimée en Dioptries) et Vergence (dont l'inverse de la distance est exprimée en Angle Métrique) se constate lorsque l'une ou l'autre est altérée en condition expérimentale ou lors d'anomalies visuelles présentées par des sujets (Judge, 1996). Les stimuli de base de l'accommodation et la vergence sont le flou et la disparité horizontale (Sweeney, Seidel, Day, & Gray, 2014). Neveu, se basant sur le modèle de Schor, parle de **lien croisé entre accommodation et vergence** ou encore de **couplage accommodation-vergence** (Neveu, 2012). Ainsi, une réponse accommodative conduit simultanément à une réponse de vergence, et réciproquement.

En conditions naturelles, l'accommodation et la vergence se produisent sur le même plan : celui du point fixé. Les modèles de Schor *et al.* et Hung *et al.* ont fourni les détails de ces mécanismes et de leurs interactions (B.-C. Jiang, Hung, & Ciuffreda, 2002). Ils décrivent une interaction dynamique entre les accommodation et vergence prédictible par une corrélation linéaire appelée **droite de demande** (voir Figure 27). De part et d'autre de cette droite de demande s'étend la zone des **réserves relatives totales**, autrement appelée la **Zone de Vision Binoculaire Simple et Nette** (ZVBSN). Il est admis que la vision binoculaire demeure confortable dans le tiers central de cette zone, c'est le critère de **Percival**. Au-delà, « le système oculomoteur est capable de maintenir une vision simple et nette malgré une certaine discordance entre les deux composantes » mais cela nécessite un effort (Neveu, 2012).

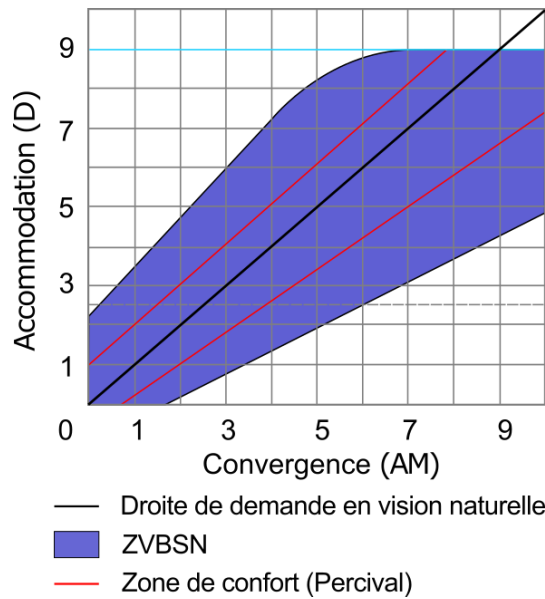


Figure 27 : Interaction entre Accommodation et Vergence, librement reproduit depuis (Neveu, 2012)
 ZVBSN = Zone de Vision Binoculaire Simple et Nette d'un sujet moyen

Cette corrélation entre accommodation et vergence se traduit notamment par les notions de vergence accommodative et d'accommodation de vergence. **La vergence accommodative** (notée AC) correspond à l'augmentation de l'angle de vergence se produisant lors de l'accommodation permettant de voir net un objet proche. On se réfère à un ratio, noté AC/A, pour définir la modification (ou réponse) de l'angle de vergence pour chaque Dioptrie de demande accommodative (Mays, 2008). **L'accommodation de vergence** (notée CA) correspond à l'augmentation de l'accommodation se produisant lorsque les yeux convergent. On se réfère à un ratio, noté CA/C, pour définir la quantité d'accommodation en Dioptries associée avec un changement de convergence donné (Mays, 2008).

La vergence accommodative et l'accommodation de vergence sont toutes deux au cœur de la représentation du système de lien croisé entre accommodation et vergence proposé par Schor et Kotulak (Sweeney *et al.*, 2014) (Schor & Kotulak, 1986) (voir Figure 28).

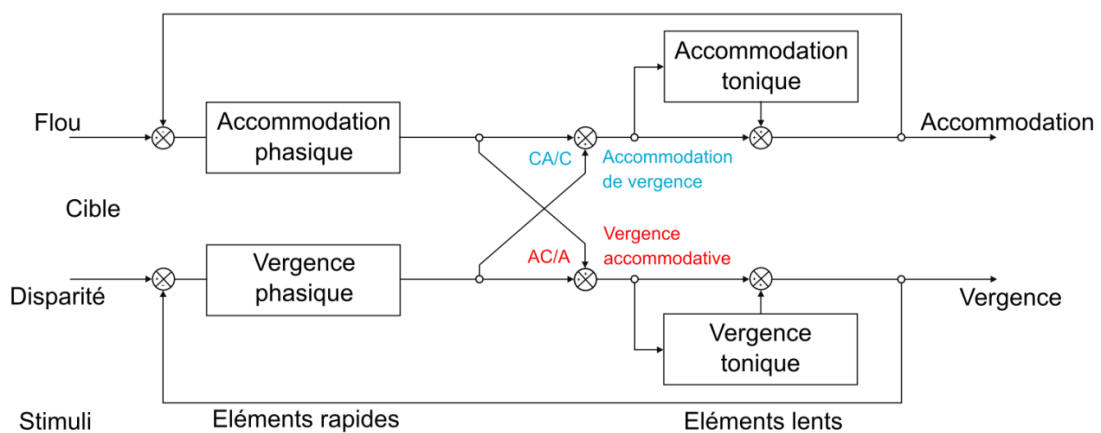


Figure 28 : Lien croisé entre Accommodation et Vergence, Modèle de (Schor & Kotulak, 1986) simplifié par (Neveu, Priot, Fuchs, & Roumes, 2009)

Le modèle de Schor et Kotulak dit de « *boucles de rétroaction négative double* » représente les deux boucles d'accommodation et de vergence chacune répondant, en parallèle, à des stimuli primaires de flou et de disparité lors de la fixation d'une cible (un objet). Comme commenté par Kim *et al.*, dans ce modèle, les réponses d'accommodation et de vergence sont divisées en trois composantes : phasiques, couplées (liens croisés) et toniques (Joohwan Kim, Kane, & Banks, 2014). La composante phasique permet une réaction rapide au changement de distance d'un objet. La composante du couplage entre accommodation et vergence est poussée par les composants phasiques (B.-C. Jiang, 1996). Enfin, la composante tonique change lentement pour aider à maintenir l'accommodation et la vergence à un rapport stable.

Schor et Kotulak ont donc modélisé les composantes des réponses accommodatives et de vergences en spécifiant leur lien croisé. L'un influence l'autre selon les stimuli. Le principe de ce système est de permettre de maintenir un rapport équilibré représenté par les ratios : CA/C et/ou AC/A . Le maintien de ces ratios au plus près de la droite de demande nécessite un effort oculomoteur idéal : une amplitude de réponse optimale. Lorsque le système visuel se focalise sur un point proche, ces mécanismes sont à l'œuvre. Ce lien croisé soulève un intérêt particulier car des stimuli altérant leur association semblent conduire à une fatigue visuelle (Schor & Tsuetaki, 1987). Or, les stimuli visuels des casques de VR et l'affichage de stéréoscopie créés des conditions particulières dont nous traitons en section 2.2.3.

2.2.2.3.2 Synthèse et contextualisation

Nous avons proposé un aperçu permettant d'établir le lien entre accommodation et convergence ainsi que le modèle de Schor et collègues afin de souligner sa prégnance sur les mécanismes oculomoteurs. Les ratios CA/C et AC/A sont coactifs. Ils s'influencent et permettent au système visuel de réguler l'effort oculomoteur pour voir les objets proches. Découpler l'interaction vergence et accommodation peut conduire à une fatigue du système oculomoteur. Or, la spécificité des stimuli visuels en HMD proposant de la stéréoscopie constitue un risque de découplage.

2.2.3 Stimuler le système visuel humain en HMD

2.2.3.1 Perception de la profondeur : enjeux pour la VR

Les principaux sens mobilisés en Réalité Virtuelle sont : la vision, la proprioception, l'ouïe, le touché et l'équilibriception. Nous venons de traiter la vision et la proprioception. Lors du développement des enfants humains, des interactions affinent chacun de ces sens et leur dynamique croisée, ex : la vision binoculaire est nécessaire à l'affinement des rapports audio-visuels notamment sur leur synchronicité (Y.-C. Chen, Lewis, Shore, & Maurer, 2017b). Bien qu'artificiellement différenciés par nos sections, ces sens et perceptions interagissent ensemble afin de nous permettre de percevoir et d'agir avec notre Environnement (réel ou virtuel) (Kawahara, 2017). Ainsi, malgré des voies neurales et des zones de traitement spécialisées identifiées dans le cerveau, il est difficile d'établir une stricte séparation. Chacun fonctionne de concert chez l'humain dit sain (sans pathologies ou troubles pouvant les influencer significativement) en optimisant la prégnance de l'un ou l'autre selon le contexte (Ernst & Banks, 2002).

C'est en cela que réside tout l'enjeu de la VR. En effet, les appareils composant le dispositif se doivent de garantir des stimuli cohérents entre eux et pouvant être traités par nos sens et

perceptions comme s'il s'agissait de stimuli sensori-moteurs « naturels ». Dans cette section, nous nous intéressons donc à la manière dont les stimuli visuels sont restitués en HMD, de façon cohérente entre eux et ne causant pas ou un minimum de conflits sensori-moteurs. Comme précédemment, nous nous concentrerons sur les stimuli permettant la perception de la profondeur, à savoir les stimuli visuels et proprioceptifs oculomoteurs.

Nous parlons donc d'interface visuelle (Stark, 1995). Les écrans, le gyroscope, le magnétomètre, l'accéléromètre et parfois le tracking des yeux d'un HMD permettent d'afficher des stimuli visuels cohérents (Jerald, 2015). L'informatique graphique se concentre depuis plusieurs dizaines d'années à restituer des images interprétables par le système visuel humain sur des écrans. Dans le cas des casques de réalité virtuelle, l'interface visuelle nécessite, d'après Fuchs, de se concentrer sur quatre caractéristiques :

- Champs de vision horizontaux et verticaux adaptés aux deux yeux
- Champs de vision binoculaire stimulé dans son ensemble par la stéréoscopie (Melzer, 2017)
- Résolution graphique (nombre de pixels des écrans) adapté à l'acuité visuelle
- Immersion complète du regard dans l'EV (Fuchs, 2016).

Ces caractéristiques sont liées aux stimuli visuels fournis par les HMDs. Pour autant, les stimuli et les feedbacks ne doivent pas ou peu perturber les boucles de Perception-Décision-Action (voir section 2.1.3.1). Il s'agit de fournir, comme l'établissent Patterson *et al.*, une Constance Perceptuelle (Patterson, Winterbottom, & Pierce, 2006). Il est par exemple nécessaire de maintenir les indices activant les capacités de prédiction probabilistes de l'œil humain suivant des objets en déplacement (Diaz, Cooper, Rothkopf, & Hayhoe, 2013).

On distingue en VR l'écran physique du HMD, rectangulaires et l'**écran projeté** (ou virtuel). Ce dernier répond à des courbes déformantes afin que l'image perçue le soit sans distorsion optique (Watson & Hodges, 1995). Un tel affichage dépend grandement des variations particulières du système visuel de l'utilisateur et du dispositif optique du HMD. Ce système d'écran physique – écran projeté permet l'affichage des images dans un espace en forme de pyramide à sommet plat, le frustum d'affichage. Le sommet du frustum correspond à la position de la caméra virtuelle (Steinicke *et al.*, 2009). En fonction des mouvements de tête de l'observateur, il est donc nécessaire d'ajuster la position, la taille et l'orientation du frustum pour assurer la cohérence de l'affichage. Ainsi, en complément des caractéristiques de l'écran, le tracking des mouvements de la tête est nécessaire pour maintenir des stimuli cohérents.

A partir du principe de caméra et de frustum, il est possible de retranscrire les indices de profondeur binoculaires liés à la stéréopsie. C'est le principe de la **stéréoscopie** : en utilisant 2 caméras virtuelles légèrement écartée on peut reproduire l'écart pupillaire et la disparité rétinienne et ainsi mettre à profit le mécanisme de la stéréopsie (L. Parker, 1983). La stéréoscopie doit être constante (Guan & Banks, 2016) et optimisée selon le dispositif (e.g. : HMD avec smartphone) (Hamacher, Kwon, & Whangbo, 2016).

A partir des contraintes techniques que nous venons d'énoncer, nous allons passer en revue l'ensemble des indices de profondeur identifiés dans la section précédente dans une perspective

d'intégration dans les espaces virtuels. L'enjeu pour un environnement en Réalité Virtuelle est de restituer de façon constante les indices de profondeur présents en environnement réel. Il s'agit de permettre une perception de la profondeur optimale aux utilisateurs, dans le cadre d'une interaction (donc une action) de l'utilisateur dans son espace (Cutting, 1997). Certains indices sont plus complexes techniquement que d'autres à restituer.

2.2.3.2 Restituer la profondeur en environnement virtuel : indices monoscopiques

2.2.3.2.1 Affichage monoscopique statique

Il s'agit de la restitution la plus simple (Leroy, 2009). L'affichage monoscopique statique consiste à créer des images numériques statiques projetées par la suite sur un écran. Il s'agit, comme présentés en section 2.2.2.2, des lumières et des ombres, de l'interposition, de la taille relative, des gradients de texture, de la perspective et des variations de visibilité. Ceux-ci sont par exemple utilisés par une photographie affichée sur un écran.

2.2.3.2.2 Affichage monoscopique avec mouvements dans la scène

Il s'agit de restituer les indices monoscopiques, les parallaxes de mouvements, dans une scène en faisant bouger les objets ou l'environnement dans son ensemble par rapport à la ou les caméra(s) virtuelle(s). Cela implique des mouvements cohérents les uns par rapport aux autres. Comme souligné par Fuchs, dans cette configuration, le champ de vision est limité en HMD ce qui peut rendre les mouvements incohérent avec le point de vue. De plus, le changement de point de vue est commandé manuellement (par l'utilisateur). Les indices doivent donc être cohérents avec ces mouvements de l'utilisateur et éventuellement des objets virtuels. Prenant l'exemple du jeu vidéo, Fuchs indique que ce changement de point de vue est souvent opéré via un écran (d'ordinateur ou tv) et un joystick (Fuchs, 2016). Leroy prend l'exemple d'un créateur utilisant un logiciel de 3D et bougeant un objet 3D pour mieux percevoir la profondeur (Leroy, 2009).

2.2.3.2.3 Affichage monoscopique avec regard immergé (tracké)

Même configuration de départ que le précédent mais ici, l'image affichée est contrôlée par l'utilisateur. La parallaxe de mouvement est exploitée en trackant le mouvement de la tête de l'utilisateur. Selon le casque, soit les écrans sont fixes ou mobiles (Fuchs, 2016). En HMD, cette configuration d'affichage est appelée bioculaire.

2.2.3.3 Restituer la profondeur en environnement virtuel : indices stéréoscopiques

Les indices stéréoscopiques comprennent les indices monoscopiques et stéréoscopiques (Holiman, Dodgson, Favalora, & Pockett, 2011). Nous nous concentrons sur ce que Fuchs définit comme un « *affichage immersif actif* » (Fuchs, 2016), correspondant au cas du HMD.

2.2.3.3.1 Principe de la stéréoscopie en HMD

Comme nous l'avons décrit ci-avant, la stéréoscopie consiste en l'affichage de deux images légèrement différentes sur un même plan pour chaque œil (L. Parker, 1983). Il s'agit de mobiliser la séparation horizontale entre chaque œil, c'est à dire l'écart pupillaire, et le mécanisme physiologique de fusion de ces 2 images, c'est à dire la stéréopsie (Reichelt *et al.*, 2010). Cette configuration est appelée binoculaire (Pölonen, 2010). En HMD, l'affichage binoculaire

correspond à une image distincte sur chaque écran (Urey, Chellappan, Erden, & Surman, 2011) ; dans le cas d'un HMD avec un smartphone : l'écran est séparé en deux pour afficher les deux images distinctes. Les lentilles du HMDs (avec ou sans smartphone) permettent de conserver la séparation pour l'œil gauche et l'œil droit tout en déportant le plan d'accommodation sur un écran virtuel, car les écrans physiques seraient trop proches pour percevoir les images nettes. Dans le cas des HMDs aussi, les images binoculaires doivent se situer dans l'aire de Panum.

Comme nous l'avons introduit plus haut, l'affichage en VR repose sur deux caméras virtuelles qui définissent deux frusta dont les caractéristiques : taille, position et orientation, varient selon le tracking de la tête et/ou du regard de l'utilisateur. La séparation des deux caméras concorde le plus souvent à la moyenne de distance interpupillaire des individus : selon l'Anses 65 mm en France (Anses, 2014). En HMD, l'utilisateur perçoit une seule image. Les deux projections correspondant à l'œil gauche et l'œil droit sont fusionnées selon les modalités de la stéréopsie (Hodges & Davis, 1993). Prenons l'exemple d'un cube vu en HMD (voir Figure 29). Deux images légèrement différentes sont affichées sur chaque écran : chacune correspondant à une caméra et donc un œil. L'utilisateur ne voit qu'un seul cube. La parallaxe horizontale entre les deux images formant le cube donne une information de profondeur lorsque celles-ci sont fusionnées par le cerveau.

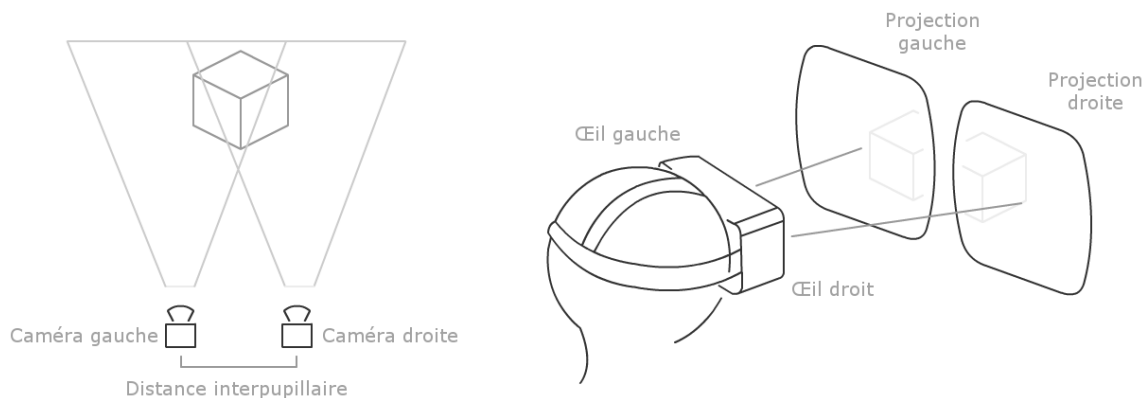


Figure 29 : Principes de génération d'une image stéréoscopique pour HMD (à gauche) et affichage (écran virtuel), sous forme de projection, en HMD (à droite), adapté librement de l'anglais d'après Lehrer, © ariellalehrer.com

Ainsi lorsqu'un utilisateur perçoit un point dans l'environnement 3D, il correspond à deux points homologues sur le plan de l'écran physique (Robinett & Rolland, 1993). La parallaxe horizontale est reportée sur ces deux points afin de produire la disparité rétinienne à l'œuvre lors de la stéréopsie (Fuchs, 2016).

Comme nous l'avons vu dans la section 2.2.2.3, le mécanisme de stéréopsie est associé aux notions d'horoptère et d'aire de Panum. Dans le contexte de la VR, nous pouvons ainsi faire le parallèle entre l'écran virtuel et l'horoptère : l'écran virtuel doit être positionné à une distance optimale pour une vision sans diplopie. De part et d'autre de ce plan se situe l'aire de Panum qui correspond à la zone dans laquelle le système visuel peut s'adapter. La projection des scènes 3D sur l'écran virtuel dans un contexte de vision stéréoscopique (Fuchs, 2016) doit prendre en compte ces contraintes. Les disparités rétiniennes proposées par la stéréoscopie en HMD

doivent donc rester conscrites à l'Aire de Panum afin de garantir la fusion des deux images par le système visuel de l'observateur. Sinon, celui-ci verra double (diplopie).

2.2.3.3.2 Cas de positionnements géométriques en HMD

Selon la valeur de la parallaxe horizontale, les objets virtuels seront perçus plus ou moins proche de lui par l'utilisateur. En fonction de la position par rapport à l'écran virtuelle, nous distinguons des parallaxes positives, nulles et négatives.

2.2.3.3.2.1 Parallaxes positives

Les parallaxes positives, dites non croisées, permettent à l'utilisateur de percevoir un objet virtuellement situé derrière l'écran (voir Figure 30). Chaque point homologue est affiché en correspondance (gauche-droite).

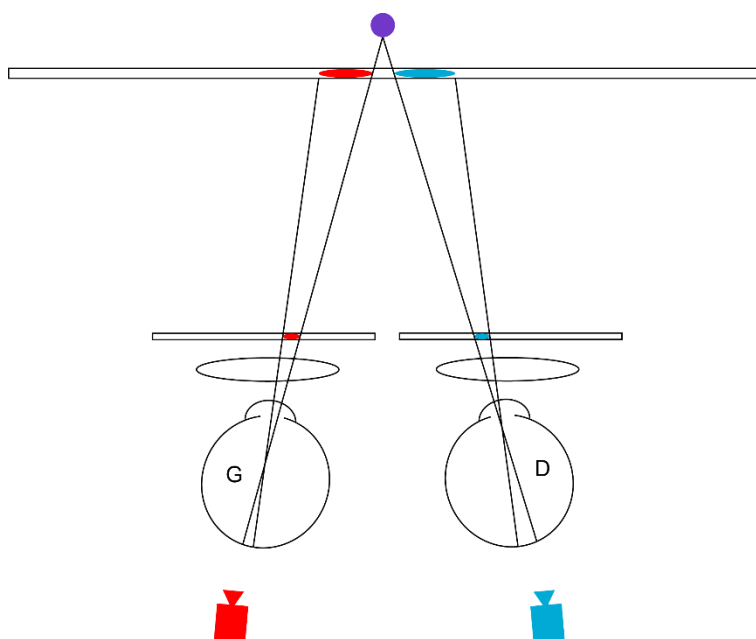


Figure 30 : Parallaxes positives en HMD, les objets sont perçus derrière l'écran virtuel (projeté), librement adapté d'après (Wann, Rushton, & Mon-Williams, 1995)

2.2.3.3.2.2 Parallaxes nulles

Les parallaxes nulles, permettent à l'utilisateur de percevoir une partie d'un objet virtuellement situé sur l'écran (voir Figure 31). Chaque point homologue est affiché au même endroit.

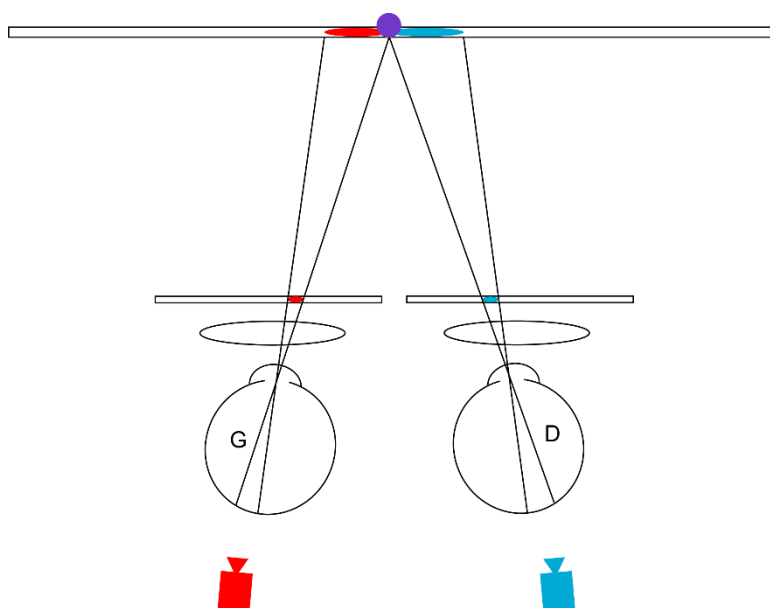


Figure 31 : Parallaxes nulles en HMD, les objets sont perçus sur l'écran virtuel (projeté), librement adapté d'après (Wann *et al.*, 1995)

2.2.3.3.2.3 Parallaxes négatives

Les parallaxes négatives, dites croisées, permettent à l'utilisateur de percevoir un objet virtuellement situé devant l'écran (voir Figure 32). Chaque point homologue est affiché à l'inverse (droite-gauche).

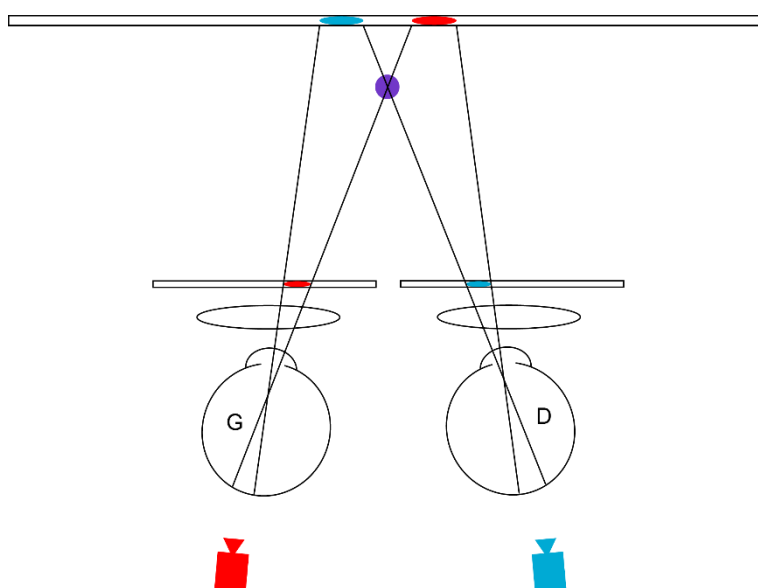


Figure 32 : Parallaxes négatives en HMD, les objets sont perçus devant l'écran virtuel (projeté), librement adapté d'après (Wann *et al.*, 1995)

2.2.3.3.3 Avantages de la restitution binoculaire en HMD

Proposer de la stéréoscopie permet de restituer les indices binoculaires en environnement virtuel. Il a été relevé en section 2.2.2.4 que ces indices sont particulièrement prégnants pour percevoir la profondeur d'une scène. En cohérence avec les indices monoculaires, la stéréoscopie permet ainsi de restituer des stimuli proches de ceux rencontrés en environnement réel. La profondeur et sa discrimination sont donc plus réalistes en VR. Cependant, Fuchs souligne que

puisque les images stéréoscopiques sont sur un plan, celles-ci ne sont pas strictement identiques à la vision spatiale réelle (Fuchs, 2016). La section 2.2.4 se concentre sur l'intérêt ou non d'implémenter la stéréoscopie dans le cadre d'un apprentissage en SG-VR. Selon McIntire *et al.*, la stéréoscopie est particulièrement avantageuse pour la manipulation d'objets dans l'espace lorsqu'en environnement virtuel (McIntire, Havig, & Geiselman, 2012).

2.2.3.3.4 Inconvénients de la restitution binoculaire en HMD

La stéréoscopie tente de restituer au mieux les indices binoculaires en environnement virtuel. Elle présente deux inconvénients majeurs. Premièrement, une partie de la population n'est pas en capacité de percevoir les indices binoculaires ou seulement partiellement (Bosten *et al.*, 2015 ; Hess *et al.*, 2015 ; Lambooi *et al.*, 2009 ; Leroy, 2016). Cette population n'est donc pas en mesure de percevoir la profondeur par ce biais et pourrait être exposé à un plus grand risque de fatigue du fait de la demande oculomotrice. Deuxièmement, la stéréoscopie désynchronise l'accommodation et la vergence (Shibata, Kim, Hoffman, & Banks, 2011). En effet, l'accommodation se réalise sur le plan de l'écran et la vergence sur l'objet virtuel fixé (Fuchs, 2016) : voir Figure 33.

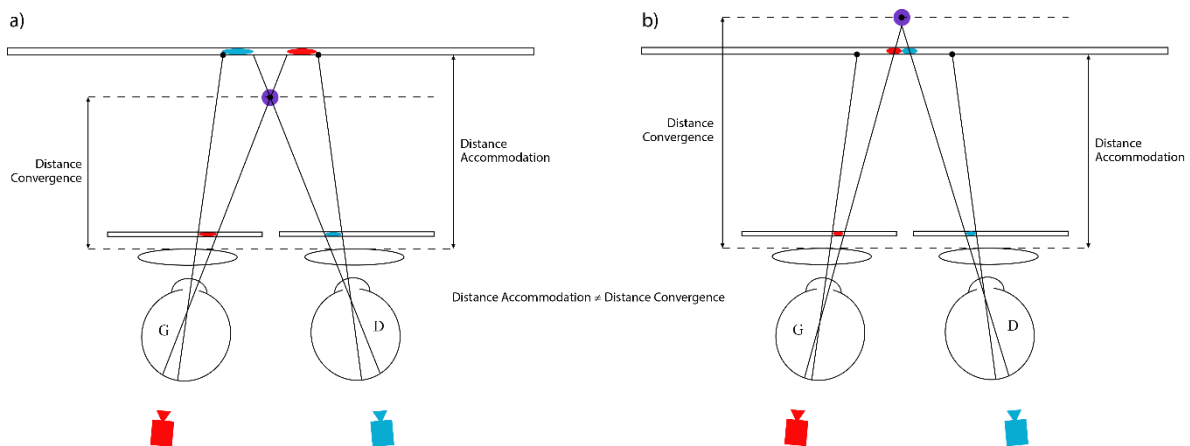


Figure 33 : En HMD, stéréoscopie avec parallaxes négatives (a) et positives (b), l'accommodation se fait sur le plan des écrans virtuels tandis que la convergence se fait sur l'objet fixé. Il y a conflit entre les deux indices.

Ce phénomène est connu comme le **conflit entre accommodation et vergence** (Banks, Kim, & Shibata, 2013). Il est remarquable en HMD au même titre que d'autres appareils affichant de la stéréoscopie. Or, ce conflit cause une fatigue ou un inconfort visuels (Lambooi *et al.*, 2009). Nous nous concentrons sur la fatigue visuelle dans la section 2.3.3. Dans d'autres technologies d'affichage (TV, écran PC) la stéréoscopie n'a pas été adoptée par le grand public (Rotter, 2017). Pourtant, elle est quasi systématiquement implémentée dans les contenus affichés en HMDs.

2.2.3.3.5 Synthèse et contextualisation

La stéréoscopie stimule les mécanismes binoculaires de la stéréopsie en Environnement Virtuel. Les HMDs peuvent afficher de telles informations. Il s'agit de deux images légèrement différentes : avec une parallaxe horizontale. Elles sont obtenues par deux caméras séparées par une distance concordante avec la distance interpupillaire moyenne des individus. Ces deux images sont projetées sur deux écrans virtuels. La stéréoscopie permet une meilleure perception de la profondeur : notamment pour les interactions avec les objets. Selon les résultats de Dan et

Reiner, le traitement des informations visuelles en 2D conduit à une plus haute mobilisation de la mémoire de travail qu'en 3D (Dan & Reiner, 2016). Cependant, un conflit entre accommodation et vergence est identifiable. Ce conflit cause de l'inconfort ou de la fatigue visuelle. Pour optimiser la perception de son environnement, le cerveau et le système visuel réorganisent les neurones (Rosa, Silva, Ferreira, Murta, & Castelo-Branco, 2013) : c'est la plasticité neuronale. Une telle plasticité liée à l'exposition à des contenus stéréoscopiques et ses conséquences à long terme ne sont pas encore connues. Par ailleurs, bien que n'impactant pas forcément les capacités de discrimination de la profondeur des objets, les capacités de précision de la stéréopsie s'amenuisent avec l'âge des humains (Schubert, Hartwig, Müller, Groh, & Pannasch, 2016). L'efficacité d'apprentissage lors de l'affichage de la stéréoscopie en HMDs n'est pas très bien établie, particulièrement dans des contextes moins dépendants d'interactions visuo-spatiales. Enfin le risque de fatigue visuelle résultant de l'affichage de la stéréoscopie, notamment en HMD, doit être mesuré. L'Anses (Anses, 2014) dans un rapport de 2014 met ainsi en garde les utilisateurs et les créateurs de contenus quant à la stéréoscopie. L'agence invite également à des contributions scientifiques afin de mieux quantifier et comprendre les impacts de la stéréoscopie. L'un des objectifs de cette thèse est de participer à de telles contributions.

2.2.4 Conclusion : système visuel humain, VR et Stéréoscopie

Ce chapitre s'est concentré sur le système visuel humain à travers 4 questions de recherche. Le système visuel humain permet de transduire la lumière réfléchiée par les objets de son environnement en informations bioélectriques lui permettant de percevoir des images. Les informations de profondeur sont de trois types : monoculaires, binoculaires et proprioceptives. Les indices proprioceptifs (accommodation et vergence) sont coactifs. En HMD les indices de profondeur sont restitués avec deux écrans et via la stéréoscopie (deux images légèrement différentes avec une parallaxe). La stéréoscopie décorrèle une partie des mécanismes d'accommodation et de vergence. Cela est source de fatigue visuelle. Cependant, afficher de la stéréoscopie est bénéfique pour des tâches avec une forte composante visuo-spatiale (e.g. apprentissage de gestes chirurgicaux). Les preuves sur la nécessité ou non d'afficher de la stéréoscopie en HMD pour l'apprentissage manquent. Ainsi, une revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage avec la 3D en HMD est nécessaire (voir section 4.1.4). Il est nécessaire d'apporter ces preuves de bénéfice ou de risque. Cela est d'autant plus prégnant que les autorités de santé (Anses) invitent à la précaution sur l'affichage de stéréoscopie. Aussi, des apports expérimentaux sont nécessaires.

La prochaine section porte sur les symptômes et effets induits par la réalité virtuelle : les conflits sensori-moteurs et la fatigue visuelle en particulier.

2.3 LA FATIGUE VISUELLE ET SA DIMINUTION

2.3.1 Introduction : fatigue visuelle et sa diminution

Cette section de l'état de l'art porte sur les symptômes et effets induits par la réalité virtuelle avec un focus sur la fatigue visuelle. Nous avons établi dans la précédente section que stimuler les perceptions et sens humains implique une constance. Depuis les débuts de la VR et avec les modèles de HMDs actuels, de nombreux problèmes demeurent afin de garantir cette constance (Keller & Colucci, 1998 ; Fuchs, 2018). Les stimuli sont parfois incomplets ou incohérents. Or,

l'humain s'est adapté à son environnement et la VR change les règles de cet environnement. Cela se joue particulièrement avec les stimuli visuels notamment pour afficher de la stéréoscopie. Bien que des recherches et des évolutions technologiques se concentrent à solutionner ces problèmes, l'arrivée sur le marché grand public n'est pas garanti. De plus, pendant ce temps, les HMDs sont adoptés pour l'apprentissage. Les effets secondaires de la VR sont regroupés sous le terme générique de cybersickness, parmi lesquels figure la fatigue visuelle.

Dans un premier temps, nous décrivons le phénomène de cybersickness causé par la VR. Dans un second temps, nous nous concentrons sur la fatigue visuelle : sa définition, ses causes en HMD. Dans un troisième et dernier temps, nous présentons des techniques de réduction de la fatigue visuelle. Cela se traduit en 4 questions de recherche : voir Tableau 6.

Tableau 6 : Questions de recherche sur effets secondaires et la fatigue visuelle en réalité virtuelle

ID	Question de Recherche
RQ3.1	Quels sont les effets secondaires liés à l'exposition à la VR ?
RQ3.2	Qu'est-ce que la fatigue visuelle ?
RQ3.3	Comment la fatigue visuelle apparaît-elle ?
RQ3.4	Quelles sont les méthodes afin de réduire la fatigue visuelle ?

2.3.2 Effets secondaires de la Réalité Virtuelle

Les effets secondaires induits par la réalité virtuelle, traduit de l'anglais: Virtual Reality-Induced Side Effect – VRISE, sont identifiés depuis les débuts de ces dispositifs (Cobb *et al.*, 1999 ; Nichols & Patel, 2002 ; Sharples *et al.*, 2008). Ces symptômes, liés aux conflits sensori-moteurs, sont le plus souvent résumés dans le mot valise de cybersickness (Moss, 2008). Selon LaViola, les symptômes sont au nombre de 11 (LaViola, 2000) : fatigue visuelle, mal de tête, pâleur, transpiration, bouche sèche, phénomène d'estomac rempli, désorientation, vertiges, ataxie (coordination des mouvements), nausée et vomissements.

La théorie la plus employée afin d'expliquer le cybersickness repose sur les incohérences sensori-motrices, principalement la vection (sensation vestibulaire et/ou visuelle de déplacement du corps) (S. Davis *et al.*, 2014). Les causes physiologiques exactes et la théorie la plus parcimonieuse ne font pas encore consensus afin d'expliquer le cybersickness (S. Davis *et al.*, 2014). La revue systématique de Davis *et al.* incluant 171 articles pointe le recours au questionnaire comme le moyen privilégié de mesurer le cybersickness et la nécessité de développer des outils pour des mesures objectives. Davis *et al.* documentent 3 types de facteur induisant le cybersickness : individuels, liés au dispositif et liés aux tâches (voir Tableau 7). Les sujets plus à risques sont : les enfants (2 à 12 ans puis dégressif à partir de 12 ans), les femmes (leur champ de vision est légèrement plus élevé que celui des hommes) et les personnes malades.

Tableau 7 : Facteurs induisant le cybersickness en Réalité Virtuelle selon Davis *et al.* (2014)

Facteurs individuels	Facteurs du dispositif	Facteurs des tâches
Âge	Lag	Contrôle
Genre	Flicker	Temps
Maladie	Calibration	
Posture	Ergonomie	

Les contenus VR avec beaucoup de mouvements présentent le risque le plus élevé de cybersickness. L'environnement bouge comme si la personne se déplaçait or, portant un HMD, la personne reste sur place. Ce décalage peut générer un effet devection et un conflit visuo-vestibulaire. Ce phénomène est encore plus important lorsque les utilisateurs se tiennent debout (Merhi, Faugloire, Flanagan, & Stoffregen, 2007).

En plus de ces symptômes établis, Nous ajoutons la fatigue physique (Nichols, 1999) : courbatures et douleurs aux bras, jambes, cou et nuque. De fortes suspicions sont entretenues concernant les HMDs et les écrans. Il y a par exemple l'influence de la lumière bleue émise par les écrans sur le sommeil (J.-Y. Heo *et al.*, 2017). Comme rappelé par Dehaene, le sommeil a un rôle prépondérant dans l'apprentissage (Dehaene, 2018). Les blessures liées à l'utilisation des HMDs (choc avec des objets de l'environnement physique) sont identifiées depuis longtemps (Costello, 1997). Elles font l'objet de description dans les sites et blogs spécialisés. Ce problème, à travers le tracking inside/out, semble cependant moins susceptible de se maintenir (Niehorster, Li, & Lappe, 2017). À long terme, les troubles musculosquelettiques sont également à envisager (H.-H. Lin, Wang, Wang, & Wang, 2018).

Bien que pointés depuis de nombreuses années (Nichols & Patel, 2002 ; Stanney, 1995 ; Stanney *et al.*, 1998), les effets secondaires et symptômes causés par l'utilisation de ces dispositifs restent d'actualité avec la nouvelle génération d'HMDs (Slater & Sanchez-Vives, 2016). Ces problématiques rejoignent des considérations ergonomiques générales (facteurs humains). Les apports scientifiques du début des années 90 présentaient des améliorations techniques susceptibles d'améliorer les HMDs et d'abaisser ces risques cependant tous les problèmes posés n'ont pas été réglés (Rebenitsch & Owen, 2016). Il ressort de l'état de l'art que le champ théorique n'est pas unifié, les résultats variés, parfois contradictoires et que les outils de mesure objective sont toujours nécessaires.

Le premier symptôme du cybersickness listé par LaViola est la fatigue visuelle. La fatigue visuelle est très liée à l'imagerie stéréoscopique. Or, la stéréoscopie favorise également les symptômes du cybersickness induit visuellement et liés aux mouvements (Keshavarz & Hecht, 2012). Dans le cadre de nos problématiques, nous nous concentrons sur la stéréoscopie et la fatigue visuelle dans la section suivante.

2.3.3 La Fatigue Visuelle

2.3.3.1 Définition

Selon Evans, la fatigue visuelle ou **asthénopie** (Roulet, 1868) décrit généralement une fatigue oculaire et des maux de tête (Evans, 2007). Il s'agit d'une faiblesse des yeux ou de la vision

donc des symptômes résultant d'une anomalie visuelle ou oculaire plutôt que de facteurs purement extrinsèques (environnementaux). Les symptômes sont : yeux fatigués, irritation, rougeur, vision floue et vision double. Lambooij *et al.* indique que la fatigue visuelle est une « *diminution de la performance du système visuel résultant d'une contrainte ou d'un stress physiologique résultant d'un effort excessif* » (Lambooij & IJsselsteijn, 2009). L'inconfort visuel est lui défini comme l'appréciation subjective des symptômes associés. Les différents champs scientifiques utilisent en synonymie inconfort visuel et fatigue visuelle.

Sheppard et Wollfsohn ont revu l'utilisation d'écrans et la fatigue visuelle pouvant en résulter (Sheppard & Wollfsohn, 2018). Selon les auteurs, une large population est à risque. Cependant, cette revue n'incorpore pas les HMDs. Certaines publications n'annonçaient aucune différence entre les effets d'écrans PC et HMDs sur le système visuel humain (Peli, 1998). D'autres annonçaient la fin de la fatigue visuelle en HMD (Rushton, Mon-Williams, & Wann, 1994). Pourtant, celle-ci demeure encore un des enjeux d'ergonomie pour ces dispositifs. Comme relevé dans la méta-analyse de Yuan *et al.* incluant 17 articles, la fatigue visuelle demeure présente avec les casques de dernière génération et celle-ci est plus élevée qu'avec d'autres dispositifs d'affichage (Yuan, Mansouri, Pettey, Ahmed, & Khaderi, 2018). Par exemple, cette fatigue visuelle plus importante en HMD comparé à une tablette se vérifie (X. Yu, Weng, Guo, Jiang, & Bao, 2018). Les précédentes études sur l'imagerie stéréoscopique font état de modifications des performances du système visuel après seulement 10 minutes d'exposition. Nombre d'expériences avec HMDs exposent les sujets à environ 30 minutes de stimuli (Kozulin, Ames, & McBrien, 2009). Concernant d'autres effets secondaires liés au système visuel, Turnbull et Phillips indiquent que l'exposition pendant 40 minutes aux HMDs ne serait pas cause de myopie (Turnbull & Phillips, 2017). Ainsi, l'exposition à long terme n'est que peu étudiée.

2.3.3.2 Causes de fatigue visuelle en stéréoscopie et HMD

La revue sur les causes d'inconfort visuel en stéréoscopie de Terzić et Hansard pointe spécifiquement les problématiques liés au système visuel des HMDs pour leur capacité à afficher des contenus en stéréoscopie (Terzić & Hansard, 2017). La fatigue visuelle causée par le conflit entre accommodation et vergence en casque de réalité virtuelle est pointée dans le cadre de l'apprentissage comme un soucis au déploiement des HMDs (Biggs *et al.*, 2018 ; Y. Matsuura, 2019 ; Ukai & Howarth, 2008 ; Yuan *et al.*, 2018). En conditions écologiques d'apprentissage, les utilisateurs rapportent un inconfort visuel (Bracq *et al.*, 2019).

La fatigue visuelle a été largement étudiée avec des dispositifs tels que les télévisions et au cinéma (Fortuin *et al.*, 2010 ; Karajeh, Maqableh, & Masa'deh, 2014 ; Kuze & Ukai, 2008 ; Lambooij, IJsselsteijn, & Heynderickx, 2007 ; Lambooij & IJsselsteijn, 2009 ; Sugita *et al.*, 2014). Cependant, malgré quelques résultats avec des HMDs de nouvelle génération, les données manquent. Par ailleurs, les tâches d'apprentissage ne sont pas privilégiées lors de l'évaluation de la fatigue visuelle et ses impacts.

2.3.3.2.1 Conflit accommodation-vergence

De précédentes études documentant les effets induits par les HMDs sur le système visuel ont pointé la fatigue visuelle due au conflit entre accommodation et vergence (Mon-Williams & Wann, 1998 ; Mon-Williams, Warm, & Rushton, 1993 ; Rushton & Riddell, 1999 ; Ujike &

Watanabe, 2015). Ces études ont été réalisées avec des casques d'ancienne génération : principalement dans les années 90. Cependant, les casques de nouvelle génération entraînent toujours des problèmes de fatigue (Hirota *et al.*, 2019) et d'inconfort visuels (T.-H. Cho, Chen, Wu, Chen, & Yin, 2017). Avec l'imagerie stéréoscopique, le conflit entre accommodation et vergence reste l'explication la plus probable de fatigue visuelle (Wee, Moon, Lee, & Jeon, 2012).

En conditions naturelles, l'accommodation et la vergence sont coactifs dans leur traitement dynamique (Schor, 1992) : voir section 2.2.2.3.4. Or, la tentative d'activer la stéréopsie via la vision stéréoscopique décorrèle les deux processus (Emoto, Niida, & Okano, 2005 ; Morse & Jiang, 1999). Comme indiqué par Fuchs, en HMD, l'accommodation est figée car les yeux focalisent sur le plan des écrans (Fuchs, 2016). Les écrans des HMDs sont très proches du système visuel et c'est grâce aux lentilles que le plan focal est déporté. Les mécanismes du système visuel sont donc confrontés à des stimuli inhabituels comparés à un environnement naturel : voir Figure 34.

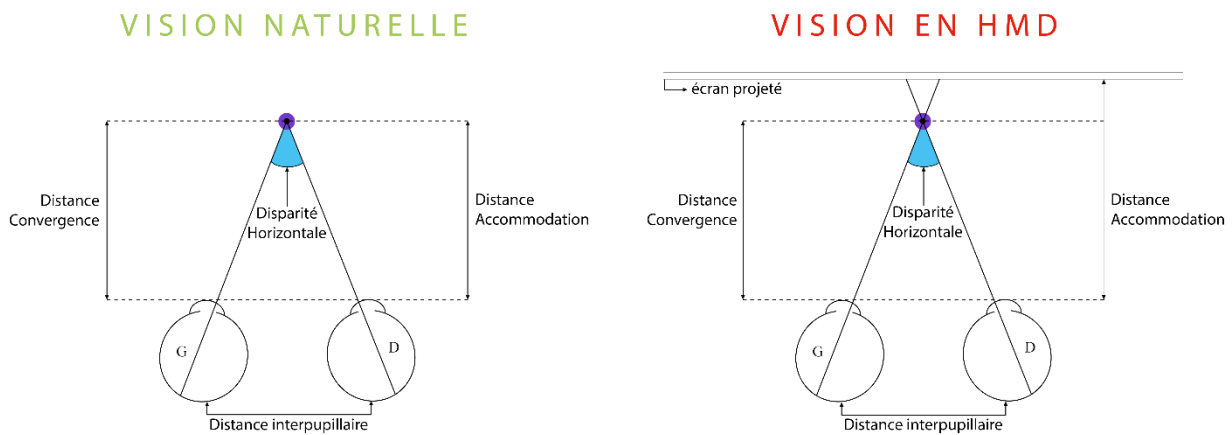


Figure 34 : Comparaison vision binoculaire naturelle et en HMD avec stéréoscopie : l'accommodation et la convergence se font sur le même plan en vision naturelle mais pas en vision artificielle (en HMD)

La décorrélation entre accommodation et vergence en condition virtuelle (en HMD) est identifiée comme la principale source de la fatigue visuelle. Shibata *et al.* ont tracé une zone de confort théorique sur la base des travaux précédents (Shibata *et al.*, 2011) (voir Figure 35). D'après ce modèle, des stimuli nécessitant des efforts d'accommodation et/ou de vergence en dehors de cette zone de confort augmentent les risques de fatigue visuelle.

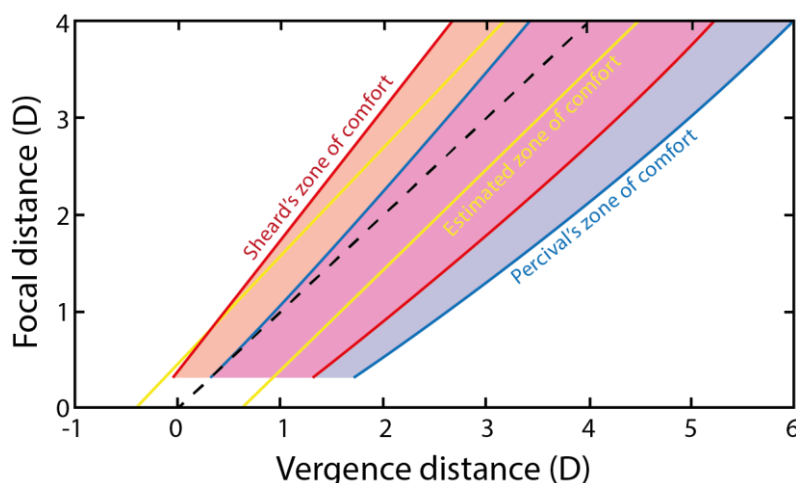


Figure 35 : Zones de confort selon les critères de Percival (en bleu) et Sheard (en rouge) (Shibata *et al.* 2011). La zone de confort (en jaune) déduite par Shibata est parallèle à la vision naturelle (pointillés noirs).

Plus les conflits entre accommodation et vergence sont rapides : plus cela est fatiguant pour le système visuel (Joohwan Kim *et al.*, 2014). De même, les images proches (en profondeur) du système visuel sont plus susceptibles de fatiguer (C. Chen, Wang, Li, Liu, & Chen, 2015). Ainsi, la parallaxe négative est plus susceptible de causer une fatigue visuelle (Y. Liu, Wang, & Wang, 2009).

Kweon *et al.* comparent des vidéo affichées en VR ou en 2D et le type de contenu (Sport, Nouvelles et Publicité) (Kweon *et al.*, 2018). Ils montrent que l'activité des ondes cérébrales Beta de 20 sujets est en général plus élevée en VR qu'en 2D et particulièrement pour les contenus avec des scènes visuelles complexes (changements de profondeur, mouvements). La VR consomme donc plus de ressources cognitives que la 2D. Les auteurs pointent par ailleurs que les symptômes liés à la VR (inconfort, vertige, mal de tête, fatigue) sont révélés par cette haute activité des ondes cérébrales Beta.

Chao *et al.* exposent 36 sujets à des contenus en stéréoscopie via écran PC pour des tâches d'assemblage et désassemblage (Chao, Yau, Lin, & Feng, 2019). Les auteurs notent que l'efficacité aux tâches n'est pas négativement impactée par la stéréoscopie bien que les sujets rapportent une fatigue visuelle. Le Punctum Proximum d'Accommodation se modifie négativement après 1h d'exposition tandis que le Seuil Critique de Fusion se modifie négativement dès 30 minutes d'exposition. Chao *et al.* notent que la fatigue visuelle est liée au temps d'exposition aux contenus.

2.3.3.2.2 Relief/profondeur excessifs et fréquences spatiales

En lien direct avec le conflit entre accommodation et vergence, la valeur de disparité appliquées aux images afin d'induire la stéréopsie doit être limitée car elle participe à la fatigue visuelle et peut causer la diplopie. Plus précisément, elle doit rester dans l'air de Panum pour que la fusion des deux images reste possible (Neveu, 2012). Selon Fuchs un stress visuel dès 1.5° pour des objets virtuels très « proches » de l'utilisateur est identifiable (Fuchs, 2016). Cette disparité maximale a été établie sur la base des valeurs recommandées à ne pas dépasser par Wöpkín à 70 minutes d'arc (Wöpkín, 1995) et par Bando *et al.* de 30 à 40 minutes d'arc (Bando *et al.*, 2012). Selon Patterson, de 80 minutes d'arc pour des fréquences spatiales élevées et jusqu'à 8°

pour des fréquences spatiales basses des images sont fusionnables (Patterson, 2009). Ces valeurs de référence sont très variables selon les sources. Cependant, il apparaît que plus la disparité est élevée, plus le risque de fatigue visuelle est élevé. Par ailleurs, des changements répétés et importants de disparités dans les mêmes scènes, les mouvements des objets, en stéréoscopie conduisent à plus d'inconfort (Speranza, Tam, Renaud, & Hur, 2006).

Perrin extrapole les données de Wöpkén en une fonction de confort selon les fréquences spatiales d'une image (Perrin, 1998) : voir Figure 36. Comme indiqué en section 2.2.2.3.4, selon Schor *et al.* la variation des informations de profondeur fusionnables est plus élevée avec des fréquences spatiales élevée et réduit l'aire de Panum (Schor *et al.*, 1984).

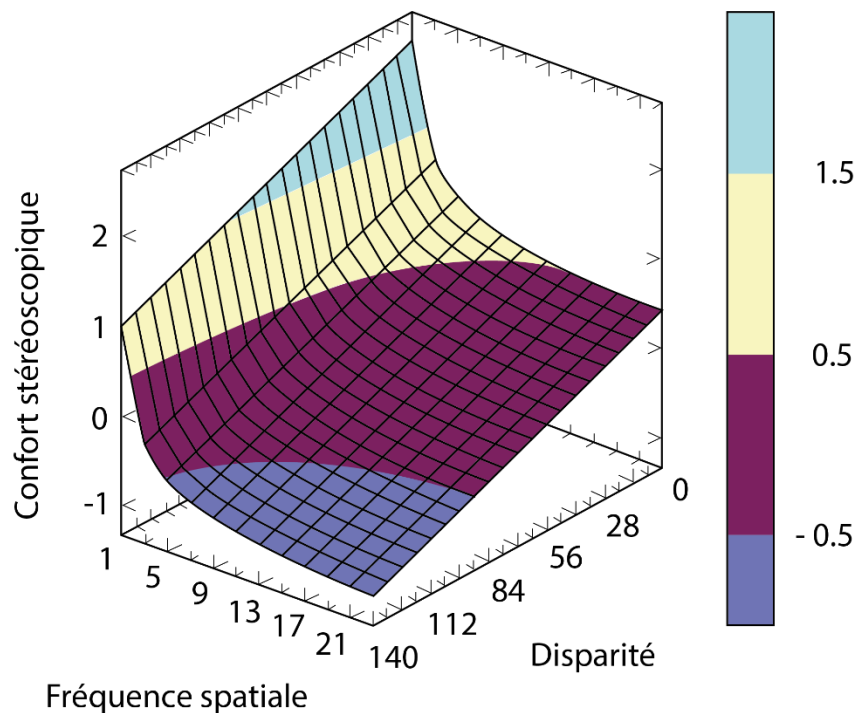


Figure 36 : Confort en affichage stéréoscopique selon la Fréquence spatiale et la Disparité d'après Perrin (1998)

D'après Kim *et al.* l'activité cérébrale dans les Champs oculaires frontaux (cortex frontal) est plus importante quand des images en stéréoscopie à fortes disparités, donc risquant de fatiguer, sont présentées (Dongchan Kim, Jung, Kim, Ro, & Park, 2011a). Comme nous l'avons vu précédemment, cette région est responsable des saccades et des mouvements volontaires des yeux, donc communique avec les muscles extra-oculaires (Leigh & Zee, 2015).

2.3.3.2.3 Propriétés graphiques des images

Les couleurs des images ont une influence sur la fatigue visuelle, particulièrement leurs changements fréquents (Jeong-Yeop Kim, Kim, & So, 2016). En plus de fatiguer, les parallaxes négatives peuvent influencer la perception des distances en surestimant la proximité des objets (Vienne, 2013). Croisant les précédentes études, il apparaît que les fréquences spatiales élevées, les images très claires et très saturées influencent négativement la fatigue visuelle.

2.3.3.2.4 Mauvais réglages du HMD et de ses composants selon l'utilisateur

Afin d'assurer une vision stéréoscopique optimale, les lentilles des HMDs doivent être alignées avec les écrans et les yeux de l'utilisateur. Plusieurs HMDs permettent aux utilisateurs de régler

eux-mêmes l'écart entre les lentilles afin d'obtenir une vision confortable. Or, il est envisageable que de tels réglages puissent conduire à plus d'inconfort et de fatigue s'ils sont mal effectués. Par ailleurs, selon les modèles, les réglages peuvent être inadaptés aux personnes avec une distance interpupillaire très petite : cela concerne particulièrement les enfants (Ukai & Howarth, 2008). La luminance des écrans peut également influencer la fatigue visuelle (A.-H. Wang, Kuo, & Huang, 2010).

2.3.3.3 Conclusion et synthèse

La fatigue visuelle est une problématique d'ergonomie avec les outils numériques en général et pose des enjeux de santé publique mais les HMDs ne sont que peu inclus voire absents dans ces considérations (Coles-Brennan, Sulley, & Young, 2019). La fatigue visuelle en HMD semble encore se produire. L'imagerie stéréoscopique causant un conflit entre accommodation et vergence est précisément pointée dans la littérature. Cependant, encore peu de contributions mesurant la fatigue visuelle avec les HMDs de nouvelle génération sont présentes. De plus, les tâches d'apprentissage sont rarement employées pour mesurer la fatigue visuelle. Selon Park *et al.*, la fatigue visuelle causée par le visionnage de vidéos en stéréoscopie induit systématiquement une activation accrue des nerfs sympathiques, ce qui affecte négativement la fonction cognitive (S. Park, Won, Mun, Lee, & Whang, 2014). Il apparaît que l'activité cérébrale est influencée par la fatigue visuelle (Cao, Wan, Wong, da Cruz, & Hu, 2014). Cela pourrait causer de la fatigue cognitive (Yingtuo Wang, Liu, Li, & Wang, 2016). Or, des humains apprenants requièrent des fonctions cognitives les moins altérées possibles. Il est ainsi légitime de s'interroger sur les éventuels impacts négatifs de la fatigue visuelle sur l'efficacité d'apprentissage.

Les apports empiriques concernant les impacts possibles de la fatigue visuelle sur l'apprentissage en VR sont encore rares. Ils portent le plus souvent sur la fatigue visuelle induite par l'imagerie affichée : 2D ou S3D. La S3D cause une fatigue visuelle pouvant se révéler une charge (cognitive) supplémentaire pour l'apprenant, abaissant ses aptitudes et ses performances. Il est donc nécessaire de la quantifier avec les nouvelles générations d'HMD et tenter de la réduire.

La prochaine section traite des méthodes pour mesurer la fatigue visuelle en HMD.

2.3.4 Mesurer la Fatigue Visuelle

Les méthodes et matériels de mesures décrits ci-après ne sont pas employés exclusivement dans le cadre des Serious Games affichés dans des HMDs. La littérature précédente porte beaucoup sur les TV affichant de la stéréoscopie, le cinéma 3D et les CAVES. Nous excluons les mesures dépendantes de compétences ophtalmologiques et matériel équivalent car les méthodes à favoriser sont celles facilement déployables dans le cadre de l'entreprise.

2.3.4.1 Mesures optométriques

De nombreux articles se rapportent à l'état du système accommodatif et de vergence du système visuel humain comme indicateur d'une fatigue visuelle après exposition à des contenus (souvent S3D) (Aurat, Hugues, Leroy, & Fuchs, 2016 ; Bouaniche & Leroy, 2016 ; Fortuin *et al.*, 2010 ; Karajeh *et al.*, 2014 ; Karpicka, 2015 ; Leroy, 2009 ; 2016 ; Leroy, Fuchs, & Moreau, 2012 ; Marran & Schor, 2000 ; S. Oliveira, Jorge, & González-Méijome, 2012 ; O'Connor,

Birch, Anderson, & Draper, 2010 ; Rushton *et al.*, 1994). Nous nous concentrons majoritairement sur l'évaluation de la vision binoculaire via des paramètres conseillés dans des méthodes cliniques (J.-S. Lee, 2019 ; W. Lin, 2016 ; Scheiman & Wick, 2014). Cependant, l'emploi de l'oculomètre est également présenté pour permettre à de future recherche de le considérer.

2.3.4.2 Mesures via oculomètre

2.3.4.2.1 Principes

L'oculométrie est une technique permettant de suivre le regard d'un utilisateur, par exemple au sein d'un univers virtuel (Duchowski, 2017). L'avantage est de mesurer l'endroit où se porte le regard de l'utilisateur dans une scène au cours du temps (Majaranta & Rähkä, 2012) et d'enregistrer les comportements des yeux. La technologie la plus démocratisée est l'utilisation de la video oculography (VOG) (Zemblys & Komogortsev, 2018). Cela implique une grande consommation d'énergie (contrainte déterminante pour une utilisation en entreprise ou grand public) : l'estimation de l'emplacement du regard s'opère sur la base de la pupille (son centre) et la réflexion cornéenne (d'une lumière émise sur l'œil).

Cette technique a l'avantage d'être non invasive, en temps réel mais comporte des difficultés de mise en œuvre (Majaranta & Bulling, 2014) : précision (Dalrymple, Manner, Harmelink, Teska, & Elison, 2018), perte du tracking, hypothèse de base d'une attention visuelle portée sur la tâche, influence du contenu (luminance, couleurs, mouvements (Binaee, Diaz, Pelz, & Phillips, 2016 ; Goldberg & Wichansky, 2003), effets contextuels liés à l'appareil (nocebo) (Höfler, Gremsl, & Schienle, 2018). La vue d'ensemble de Park *et al.* pointe l'oculomètre comme un moyen d'acquisition des variables utiles à la mesure de la fatigue visuelle dans le cadre des affichages en stéréoscopie (M.-C. Park & Mun, 2015).

La combinaison oculomètre et HMD retient l'attention de chercheurs de domaines variés pour la capacité de contrôle de l'environnement d'expérimentation et l'acquisition des données en temps réel (Clay, König, & König, 2019). L'oculomètre est le plus souvent utilisé dans la littérature pour suivre le regard dans un environnement virtuel et obtenir des points d'intérêt (heat-map, POI). C'est le cas par exemple lors d'apprentissages pour lesquels la spatialisation du regard témoigne de l'acquisition d'une connaissance (Potgieter & Blignaut, 2018) ou l'e-learning (Ivanović, Klačnja-Milićević, Ivković, & Porta, 2017). Bien que les caractéristiques des oculomètres embarqués (par exemple dans un HMD) impliquent une moins grande précision, cette dernière est suffisante pour les enjeux de fatigue visuelle (Sievert, Witzki, & Nitzschner, 2019).

2.3.4.2.2 Solutions techniques existantes (mai 2019)

Utiliser l'oculomètre pour mesurer l'état de la fatigue visuelle lors de l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle émerge comme une solution viable (Evgeniy Abdulin & Komogortsev, 2015). Il faut considérer que les métriques habituellement utilisées par cette technique de mesure impliquent un matériel avec des caractéristiques plus élevées que celles possibles avec les oculomètres embarqués en HMD (Evgeniy Abdulin, Rigas, & Komogortsev, 2016), donc coûteux. D'autres stratégies de mesures sont ainsi considérées dans ce contexte particulier : 1) un matériel moins coûteux 2) mais moins précis 3) et embarquable dans un casque VR. Des modèles d'analyse associés sont donc développés et à l'épreuve (Lohr, Abdulin, & Komogortsev,

2016). Les variables considérées sont dépendantes de ces modèles (Vasiljevas *et al.*, 2016). La Figure 37 résume les principaux outils disponibles pour les entreprises en mai 2019.

Figure 37 : 5 solutions de HMD avec Oculomètre disponibles en mai 2019

Entreprise	Sortie	Page web solution
FOVE	2016	https://www.getfove.com/ ³
HTC	2019	https://enterprise.vive.com/us/product/vive-pro-eye/ ⁴
Tobii + HTC	2016	https://www.tobii.com/fields-of-use/immersive-vr-research/ ⁵
SMI + HTC	2016	https://www.smivision.com/ ⁶
LemnisTech	2019	http://www.lemnis.tech/ ⁷

Parallèlement, plusieurs solutions ont été développées en laboratoire : par exemple, EyeSpyVR développé par Ahuja *et al.* repose sur un iPhone et une de ses caméras lorsque le téléphone est utilisé en casque de réalité virtuelle. La solution se concentre sur les blinks (clignement d'œil) ainsi que les mouvements de l'œil (saccades) (Ahuja *et al.*, 2018).

2.3.4.2.3 Variable à considérer

Iskander *et al.* ont procédé à une revue des modèles biomécaniques afin de mesurer la fatigue visuelle avec les mouvements des yeux (Iskander, Hossny, & Nahavandi, 2018). Leur apport est à considérer et nous l'avons complété par une revue des variables considérées dans la littérature (voir Annexe 1). 13 apports expérimentaux sur la période 2011-2019 ont été analysés. La fatigue visuelle est globalement mesurée via le clignement des yeux. Les résultats expérimentaux sont contradictoires concernant la fatigue visuelle.

Certains articles rapportent que le clignement des yeux plus fréquent avec la fatigue visuelle. Cela peut s'expliquer par le réflexe de pallier l'assèchement des yeux. Ainsi, pour 6 études sur 13, le clignement des yeux augmente lorsque les sujets sont exposés à de la S3D ou vers la fin des tâches (Bang, Heo, Choi, & Park, 2014 ; S.-H. Cho & Kang, 2012 ; Iatsun, Larabi, & Fernandez-Maloigne, 2015 ; Donghyun Kim, Choi, Park, & Sohn, 2011b ; Jungho Kim, Kumar, Yoo, & Kwon, 2018b ; E. Lee, Heo, & Park, 2010 ; S. Park *et al.*, 2019). En revanche, pour 3 études sur 13, le clignement des yeux baisse lorsque les sujets sont exposés à de la S3D (Conti, Ozell, Paquette, & Renaud, 2017 ; Divjak & Bischof, 2009 ; Dongchan Kim *et al.*, 2011a).

Le diamètre de la pupille semble plus élevé lorsque les sujets déclarent un inconfort et les fixations sont moins élevées. De façon cohérente, 2 études sur 13 rapportent une chute du nombre de saccades avec le temps d'exposition (Conti *et al.*, 2017 ; Iatsun *et al.*, 2015). Une étude va cependant à l'encontre de ces résultats et indique une augmentation des microsaccades si la

³ Home - FOVE Eye Tracking Virtual Reality Headset. Last accessed 20/08/2019. Retrieved from <https://www.getfove.com/>

⁴ VIVE Pro Eye. Last accessed 20/08/2019. Retrieved from <https://enterprise.vive.com/us/product/vive-pro-eye/>

⁵ Tobii Pro (2017, June 20). Last accessed 20/08/2019. Eye tracking research in immersive virtual environments. Retrieved from <https://www.tobii.com/fields-of-use/immersive-vr-research/>

⁶ Eye Tracking Solutions by SMI. Last accessed 20/08/2019. Retrieved from <https://www.smivision.com/>

⁷ Work Smarter with Mixed Reality. Last accessed 20/08/2019. Retrieved from <http://www.lemnis.tech/>

disparité est élevée, une disparité élevée étant elle-même associée à une fatigue visuelle plus élevée (Vienne, Blondé, & Doyen, 2012).

Blinks (clignement des yeux) : cette métrique est identifiée depuis plusieurs années pour mesurer la fatigue (Stern, Boyer, & Schroeder, 1994). La méta-analyse de Martins et Carvalho (21 publications incluses) se concentre sur le clignement des yeux comme métrique de la fatigue (incluant la fatigue visuelle) et de la charge mentale (Martins & Carvalho, 2015). Les auteurs consignent qu'au moins trois facteurs environnementaux influencent le clignement des yeux : la température, l'humidité relative et les conditions d'éclairage. Martins et Carvalho indiquent que le clignement des yeux est un bon indicateur pour mesurer la fatigue et la charge mentale. Cependant, les actions de l'humain et les stimuli impactent le nombre de clignement (Gebrehiwot, Paprocki, & Lenskiy, 2016). D'après Lenskiy et Paprocki, une tâche de lecture abaisse le nombre de clignements et par rapport au repos (Lenskiy & Paprocki, 2016). La vitesse des mouvements dans une scène avec de la stéréoscopie réduit le nombre de clignements et le confort visuel (Jing Li, Barkowsky, & Le Callet, 2013). Tôt chez l'humain (dès 5 mois), les clignements sont un indicateur de l'activité de la dopamine reliée à l'activité cognitive (Bacher, Retz, Lindon, & Bell, 2017).

Via l'oculomètre, nous pouvons donc employer les clignements des yeux comme marqueurs de fatigue visuelle. Un blink dure entre 100 et 400 ms. La norme au repos pour un adulte est de 12 (Rodriguez *et al.*, 2018) à 22 (Rosenfield, Jahan, Nunez, & Chan, 2015) clignements par minute. Ces valeurs changent selon les tâches des personnes : conversation > au repos > lecture (Bentivoglio, Bressman, Cassetta, Carretta, & Albanese, 1997).

2.3.4.3 Synthèse : mesurer la Fatigue Visuelle

Dans notre contexte : industriel, l'emploi des mesures optométriques semble le plus indiqué car le modèle de HMD employé ne permet pas l'implémentation d'oculomètre. De plus, la comparabilité de nos résultats avec de précédentes études est plus assurée avec l'emploi des mesures optométriques (voir section 3.4) comparé à l'oculomètre. Cependant, ce dernier est à considérer car disponible sur le marché grand public au moment où cette thèse s'achève.

La prochaine section traite des manières de diminuer la fatigue visuelle en HMD.

2.3.5 Diminuer la Fatigue Visuelle

La stéréoscopie en général, affichée en HMD stresse le système visuel. Diminuer ce stress apparaît nécessaire. Faire des pauses régulières pourrait apparaître comme une solution viable. Cependant, Guo *et al.* ont montré que faire des pauses lors de l'exposition à des contenus stéréoscopiques en HMD aggrave la fatigue visuelle (J. Guo, Weng, Zhang, Liu, & Wang, 2019). La manière la plus simple de diminuer la fatigue visuelle est de limiter l'exposition dans le temps. De nombreuses stratégies sont étudiées afin de réduire la fatigue et/ou l'inconfort visuels. Bando *et al.* répertorient trois approches afin de prévenir la fatigue visuelle : aligner les images avec les yeux, limiter la disparité, contrôler les conditions d'observation (distance de visionnage, position des caméras) (Bando *et al.*, 2012). Bien que l'étude de Bando *et al.* intègre les HMDs, la plupart des conseils afin de réduire le stress visuel restent très généraux et s'appliquent seulement en partie aux contenus traités dans notre cas. Comme le relèvent Terzić et

Hansard à travers leur revue, les méthodes de réduction de l'inconfort ou la fatigue visuels sont variés (Terzić & Hansard, 2016). Ils indiquent que ces méthodes sont peu comparables car incluant des variables différentes.

Nous identifions deux typologies de réduction : active et passive. Une **réduction active** consiste à implémenter des modules informatiques appliquant des corrections sur le logiciel ou le hardware dynamiquement (ex : réduction des fréquences spatiales ou flous aux endroits non regardés). Une **réduction passive** consiste à régler, lors de la conception, les propriétés du contenu afin de limiter au maximum les stress visuels, de manière non dynamique (ex : ne pas dépasser une certaine disparité, exclure les images avec des fréquences spatiales élevées). Nous détaillons ces deux types d'approches ci-après.

2.3.5.1 Réduction passive de la fatigue visuelle

2.3.5.1.1 Limiter les disparités en amont

Comme présenté en section 2.3.3.2.2, une disparité excessive fatigue : la valeur la plus haute déterminée par littérature est celle annoncées par Fuchs avec une disparité rétinienne au-delà de 1.5° pour des objets virtuels très « proches » de l'utilisateur (Fuchs, 2016). Ces valeurs dépendront de l'étendue de l'air de Panum des personnes, elle-même dépendante des fréquences spatiales des images présentées (Schor *et al.*, 1984). Sans une étude de chaque image, il est difficile de proposer des valeurs limites claires de disparité. En croisant les trois sources de recommandations, la fourchette se situe de $0,5^\circ$ à $1,67^\circ$. L'on pourrait arguer que des scènes interactives reposant sur la discrimination de la distance pourraient profiter d'une plus grande disparité. Ainsi, établir une disparité plafond à $0,5^\circ$ par exemple, en respect avec les recommandations, serait un choix a priori parcimonieux mais trop arbitraire selon les contenus. Cependant, certaines investigations telles que l'étude d'Oh *et al.* indiquent qu'un tel traitement peut réduire le sentiment d'inconfort (N=10 sujets) dans le cas de vidéos en stéréoscopie (Oh, Ham, Choi, & Sohn, 2015).

2.3.5.1.2 Ne pas utiliser la stéréoscopie (imagerie bi-oculaire)

Dans l'idée de reproduire le plus fidèlement possible les indices naturels, un environnement virtuel binoculaire (S3D) devrait être moins fatigant pour le système visuel qu'un environnement bi-oculaire (2D). C'est ce que suggère la méta-analyse de Yuan *et al.* : les auteurs pointent l'imagerie bi-oculaire comme un facteur influençant négativement la fatigue visuelle (Yuan *et al.*, 2018).

Ces résultats sont toutefois en désaccord avec l'ensemble de la littérature qui mesure la fatigue induite par la stéréoscopie la plupart du temps par rapport à des conditions contrôle en 2D. Ainsi, une solution simple de réduction de la fatigue visuelle pourrait consister à proposer deux images identiques en HMD, c'est à dire bi-oculaire.

Néanmoins, il est difficile de statuer sur quelles interactions nécessitent des informations de relief afin d'accomplir les tâches avec succès (Bowman & McMahan, 2007). Par exemple, la S3D apparaît plus efficace que la 2D lorsque des actions impliquent fortement des manipulations dans l'espace (McIntire, Havig, & Geiselman, 2014 ; Winterbottom *et al.*, 2017). D'autre part, le sentiment de présence pourrait pâtir de ne pas mobiliser la stéréoscopie (Cummings &

Bailenson, 2015 ; Freeman *et al.*, 1999), bien que cela ne se vérifie pas dans toutes les configurations (Baños, Botella, Rubió, & Quero, 2008 ; Ling, Brinkman, Nefs, Qu, & Heynderickx, 2012).

L'absence de stéréoscopie dans le cas de l'utilisation d'un HMD n'est de plus pas une garantie de l'absence de conflit accommodation-vergence car l'écran se trouve très proche des yeux. Cela nécessite des apports expérimentaux.

2.3.5.2 Réduction active de la fatigue visuelle

2.3.5.2.1 Flous dans l'image

Il s'agit de mettre en place des algorithmes de traitement dont l'image résultante sera floutée à des endroits donnés. Cela a été par exemple appliqué avec succès pour réduire l'inconfort visuel, mesuré subjectivement, dans le contexte d'images fixes sur TV proposant de la stéréoscopie (Y. J. Jung, Sohn, Lee, Speranza, & Ro, 2013). Leroy montre que de tels traitements de l'image permettent de réduire le stress visuel (Leroy, 2016). En effet, en relâchant l'accommodation par le flou celle-ci va suivre la vergence (Fujikake *et al.*, 2014). Différentes stratégies de traitement sont décrites. Cependant, l'esthétisme des environnements virtuels en pâtit (Leroy, 2009 ; Leroy *et al.*, 2012). Or, dans le cas d'un SG-VR, la dimension esthétique influence la manière dont il sera reçu par les utilisateurs et pourrait ainsi impacter son efficacité. De plus, ce flou est parfois obtenu en fonction de la position du regard et se base donc sur son tracking (Aurat *et al.*, 2016). Cependant, selon les performances de calcul des appareils utilisés, conditionner le flou selon le tracking peut entraîner des latences (Aurat, 2016). Par ailleurs, ces précédentes études mobilisent des CAVes ou des Télévisions, pas des HMDs. Il est donc difficile d'étendre les résultats obtenus à ces derniers.

Carnegie et Rhee ont transposé ce principe de flou en HMD avec un Oculus® Rift DK1™ (Carnegie & Rhee, 2015). Le postulat de l'application du flou considère que, sur base d'études précédentes en jeu vidéo, 82% des joueurs regardent le centre de l'écran pendant 86% du temps. Ainsi, leur algorithme applique un flou gaussien en périphérie des scènes selon l'orientation du HMD. Un cercle net est laissé au centre. Quatre environnements différents ont été conçus : deux environnements (un temple et une montagne) chacun avec ou sans flou. Les sujets (N = 20) sont exposés à deux Environnements Virtuels (la version flou et non flou) à deux reprises (un jour différent pour chaque session). Lors de la première session, l'ordre d'exposition est aléatoire, l'ordre est inversé dans la seconde session. Leur tâche consiste à explorer ces espaces à travers un avatar à la première personne. Les contrôles se font avec clavier, souris et le tracking de la tête du gyroscope du Rift™. Leur confort visuel est évalué à travers le Simulator Sickness Questionnaire (18 items). Les sujets ont répondu oralement à trois questionnaires : après la première exposition, après la seconde exposition puis 15 minutes après repos (yeux fermés). Les différences entre les réponses sont calculées. Les auteurs concluent, sur la base des réponses à certains items du SSQ que le flou réduit significativement l'inconfort visuel. Ces résultats sont à relativiser du point de vue de l'apprentissage. En effet, aucune tâche précise n'est à accomplir, il s'agit de navigation simple. Il n'y a pas d'objets en mouvement pouvant influencer sur l'inconfort visuel. Bien que cohérent avec de précédentes études sur le temps d'exposition, une pause non chronométrée le temps de soumettre le SSQ entre deux expositions (flou / pas flou) peut résulter

en un relâchement variable du stress visuel entre les sujets. Cependant, le principe et les premiers résultats sont encourageants.

La démarche de Porcino *et al.*, consiste à modéliser sous forme d'équation un flou opéré aux régions d'intérêts (ROI) plutôt que selon le tracking de la tête et le seul centre de l'écran (Porcino, Clua, Trevisan, Vasconcelos, & Valente, 2017). Ils se basent sur l'étude précédemment décrite de Carnegie et Rhee. Ils n'ont pas encore mené les études afin de recueillir les preuves empiriques de l'efficacité de leur modèle.

Le champ de vision (FOV = Field Of View) joue un rôle prépondérant dans l'application de tels flous (Duchowski *et al.*, 2014). L'efficacité sera donc variante selon le FOV des dispositifs : dans notre cas les HMDs (Á. Segura, Barandiaran, Moreno, Barandiaran, & Flórez, 2017).

2.3.5.2.2 Stéréoscopie intermittente et cyclique

Il s'agit d'utiliser la stéréoscopie de façon intermittente pour afficher du relief et profiter de ses avantages sur la spatialisation par exemple. Cette idée a été proposée par (S. Matsuura, 2013). Selon son étude, le retour subjectif des sujets indique une baisse de la fatigue visuelle. De plus, Matsuura rapporte que les sujets maintiennent leur perception en relief des objets présentés même lorsque ceux-ci ne sont plus en stéréoscopie. À la suite de ces travaux, Bouaniche et Leroy ont évalué cette approche dans le cadre de la réalisation de certaines tâches. Ils proposent quatre tâches aux sujets (N = 60) et ont mesuré leur l'efficacité à les accomplir selon les conditions proposées (Bouaniche & Leroy, 2016). Ces tâches reposent sur la capacité des sujets à discriminer la profondeur dans un Environnement Virtuel (EV). Une des conditions expérimentales consistent à proposer de la stéréoscopie en début de tâche puis en fin de tâche avec un retour en bi-oculaire en trois secondes. Les deux autres sont des conditions contrôle : stéréoscopie constante et bi-oculaire constante. Leurs résultats suggèrent une corrélation entre la fatigue visuelle et le temps d'exposition à la stéréoscopie, les différences observées ne sont toutefois pas significatives. Ils rapportent également une corrélation entre la performance et la stéréoscopie. Ils observent par ailleurs que la stéréoscopie au début apparaît plus efficace pour l'accomplissement des tâches simples proposées la stéréoscopie à la fin mais l'inverse pour les tâches difficiles. Mais la fatigue visuelle de la stéréoscopie au début est plus fatigante que celle à la fin. Bouaniche et Leroy émettent ainsi l'hypothèse selon laquelle la perception en relief des sujets se maintient et forme une « *carte mentale du relief*. » Pour autant, cette efficacité est variable selon les tâches. La fatigue visuelle ne semble pas impacter négativement la performance.

En dehors de ces deux études, la solution de la stéréoscopie intermittente demeure peu investiguée. De plus, Matsuura et Bouaniche et Leroy ont placé leurs investigations dans des Environnements Virtuels avec des enjeux esthétiques, une charge cognitive et des interactions faibles. Par ailleurs, les conditions expérimentales ne mobilisent pas des HMDs. Il serait donc pertinent d'évaluer l'impact de l'usage de la stéréoscopie avant une tâche de discrimination de la profondeur et/ou uniquement lors de la réalisation de telles tâches.

Utiliser la stéréoscopie cyclique met en question les résultats apparemment contradictoires de Cai *et al.* et Chen *et al.* En effet, l'étude de Cai *et al.* suggère que le processus d'activation de la stéréopsie fatigue plus que son processus de maintien (T. Cai *et al.*, 2017), impliquant que la

S3D cyclique se révélerait tout aussi fatigante, si ce n'est plus que la stéréoscopie permanente. L'étude de Chen *et al.* indique au contraire que la fatigue est liée au maintien (C. Chen, Wang, Liu, & Chen, 2017a) impliquant alors que la stéréoscopie cyclique serait moins fatigante que la stéréoscopie continue. Les caractéristiques précises de la méthode employée pour générer la stéréoscopie cyclique est présentée dans la section matériel et méthodes de l'expérience 2 : voir section 4.2.2.2.1.

2.3.5.2.3 Contrôle dynamique de la disparité

Il s'agit de faire varier la disparité des objets en fonction du comportement de l'utilisateur (Ware, Gobrecht, & Paton, 1995). Koulieris *et al.* présentent un prédicteur d'attention visuelle dans un jeu vidéo (First Person Shooter - FPS) servant de référence pour contrôler la disparité des objets de la scène en temps réel (Koulieris, Drettakis, Cunningham, & Mania, 2016). Afin de fournir des données à leurs algorithmes dans une démarche deep learning, Koulieris *et al.* font jouer des volontaires (N = 10) à un jeu développé via RFPS Toolkit™ avec un HMD NVisor™ SX111. Leurs résultats suggèrent un bon confort visuel. Il apparaît également que les sujets ont une meilleure appréciation de la profondeur lorsque la disparité est réglée de façon dynamique par rapport à d'autres méthodes de traitement global de l'image. Le réglage de la disparité permet également de réduire le stress visuel résultat du conflit accommodation-vergence.

Kulshreshth et LaViola choisissent d'adapter dynamiquement la disparité avec un algorithme en prenant en compte notamment l'écart interpupillaire et la taille de l'écran (Kulshreshth & LaViola, 2016). Ils conduisent une expérience dont les tâches consistent en des discriminations de la profondeur (N = 36). La première condition consiste en une stéréoscopie statique. La seconde condition affiche une stéréoscopie avec des valeurs idéales selon les variables considérées. Dans la troisième condition, le eye-tracking permet en plus de faire varier la disparité aux zones regardées. Les résultats obtenus indiquent une meilleure efficacité à l'accomplissement des tâches reposant sur la discrimination de la profondeur avec les conditions de réglage dynamique de la disparité (3^e condition). De plus, les sujets rapportent subjectivement la supériorité des conditions deux et trois pour réaliser les tâches. De façon surprenante, bien que proposant l'algorithme de réglage dynamique de la disparité comme solution limitant la fatigue visuelle, aucune mesure de celle-ci n'est proposée.

2.3.5.2.4 Modification du plan d'accommodation par oculomètre, lentilles et écrans

Une littérature émergente se concentre sur les composants des HMDs afin de créer les conditions pour adapter le plan d'accommodation selon les stimuli et les interactions de l'utilisateur. Il s'agit par exemple de proposer des nouvelles technologies d'écran comme le Light-Field (Fuchs, 2016 ; J. Yu, 2017). D'autres équipes de recherche travaillent sur les propriétés physiques des lentilles afin de les modifier dynamiquement (Bos, Li, Bryant, Jamali, & Bhowmik, 2016 ; Bui, Banks, & Drettakis, 2017 ; Stevens, Jacoby, Aricescu, & Rhodes, 2017). Enfin, de plus en plus de modèles de HMDs embarquent des oculomètres permettant de suivre le regard et donc de calculer le point de convergence pour y faire correspondre le plan d'accommodation (Laffont *et al.*, 2019). Ces techniques sont intéressantes mais requièrent une grande puissance de calcul ou bien ne sont pas encore au stade d'une possible industrialisation.

2.3.5.3 Conclusion et synthèse

Nous avons présenté deux typologies de réduction de la fatigue visuelle : active et passive. La réduction passive à l'avantage de calibrer les images à afficher pour limiter au maximum le conflit entre accommodation et vergence. Mais trop souvent, ces solutions procèdent à un traitement général des images et peuvent dégrader leur qualité. La réduction active à l'avantage de modifier les propriétés des images en temps réel mais nécessitent des ressources de calcul et du matériel coûteux.

Plus d'investigations sont nécessaires afin d'identifier une manière simple, active et applicable à la plupart des HMDs afin de réduire le stress visuel par l'affichage de stéréoscopie. Par la diffusion des HMDs et la prégnance de leur usage dans le cadre de l'apprentissage, de telles investigations pourraient bénéficier d'une dimension appliquée afin de garantir la validité écologique des données.

2.3.6 Conclusion : fatigue visuelle et sa diminution

L'exposition à la réalité virtuelle en HMD conduit à des symptômes et effets secondaires. Le cybersickness est particulièrement pointé, celui-ci se caractérise par des symptômes assimilables au mal de mer. Le cybersickness inclut la fatigue visuelle, effet secondaire qui se maintient avec l'affichage de stéréoscopie dans les HMDs. Le conflit entre accommodation et vergence demeure la source de stress visuel la plus importante.

Une dimension cognitive à la fatigue visuelle semble émerger de la littérature mais est encore peu traitée et aucune contribution ne propose une vue d'ensemble de cet aspect. Cette dimension cognitive pourrait s'avérer déterminante compte tenu de la forte charge sur la mémoire de travail de certaines tâches comme apprendre.

Mesurer la fatigue visuelle avec la nouvelle génération d'HMDs reste nécessaire, particulièrement en conditions écologiques : dans notre cas les applications de la VR pour l'apprentissage. Nous avons présenté des techniques de réduction de la fatigue visuelle. Deux types sont identifiables : actives et passives. De nouveau, excepté celles reposant sur des modifications des composants des HMDs, peu de ces techniques ont été testées avec ces dispositifs. De plus, la difficulté de mise en œuvre est un frein à leur adoption (ressources de calcul, ressources matériels). Opter pour une réduction active de type stéréoscopie cyclique nous apparaît la solution à tester car étant la moins considérée dans la littérature précédente. Elle nécessite donc des données expérimentale pour guider les concepteurs parmi les solutions listées dans cette section.

2.4 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

Les HMDs utilisés par le grand public sont des appareils permettant l'affichage de S3D. Les travaux scientifiques répertorient les appareils affichant de la S3D pour traiter des risques associés n'incluent pas encore les HMDs. C'est le cas par exemple dans certaines revues (Karajeh *et al.*, 2014 ; Suh & Prophet, 2018). Ainsi, les études sur les questions de S3D et d'apprentissage intégrant les HMDs sont encore rares. Cela peut être expliqué par leur très récente réapparition sur le marché grand public. De plus, les équipes de recherche n'utilisent pas nécessairement des appareils disponibles pour le grand public. Les entreprises créatrices de contenus, elles, utilisent ces HMDs grand public. Les premières études suggèrent que la qualité d'expérience et

l'efficacité d'accomplissement des tâches seraient différentes en HMD comparé à un PC. C'est le cas de l'étude de Santos *et al.* qui montre une meilleure efficacité à l'accomplissement de tâches de navigation (via jeu vidéo) en ordinateur qu'en HMD (Santos *et al.*, 2008). Notons que bien que parfois évoquée dans les études précédemment citées, la Fatigue visuelle reste peu considérée et mesurée pendant l'apprentissage. Bien que certaines études peu nombreuses, n'observent aucune différence entre écran d'ordinateur et HMD en terme de fatigue visuelle (Peli, 1998), la plupart indiquent que la fatigue visuelle est plus importante en HMD qu'en PC et avec imagerie binoculaire qu'en bi-oculaire (Mon-Williams *et al.*, 1993 ; Mon-Williams & Wann, 1998 ; Rushton & Riddell, 1999 ; Ujike & Watanabe, 2015). Enfin, il y a des enjeux de sécurité et de santé publique sur le dispositif d'affichage stéréoscopique qu'est le HMD (Anses, 2014). Il est donc nécessaire de mettre à jour la littérature sur les risques de fatigue visuelle en HMD avec la nouvelle génération avec une qualité expérimentale élevée (Lanier *et al.*, 2019). De la même manière, les bénéfices d'apprentissage avec SG, VR, les deux combinés et la stéréoscopie sont documentés mais peu de travaux offre une revue d'ensemble des preuves à disposition. Nous traitons ces problématiques via une revue et notre première expérience.

Afin de réduire cette fatigue visuelle en HMD, plusieurs méthodes existent. Seuls Matsuura (S. Matsuura, 2013), Bouaniche et Leroy (Bouaniche & Leroy, 2016) ont étudié l'affichage cyclique ou intermittent de la stéréoscopie. Ces expériences ont été conduites avec des environnements virtuels avec des enjeux esthétiques, de charge cognitive et des interactions faibles. Elles ne mobilisaient pas les HMDs. Tester ces modalités d'affichages avec des enjeux plus élevés sur ces trois caractéristiques mais sans la nécessité de discrimination de la profondeur pour accomplir les tâches serait intéressant. Les études étant encore très hétérogènes. Ainsi, mesurer les effets de la stéréoscopie cyclique sur le système visuel par le biais de l'évaluation de l'inconfort visuel et de la fatigue est nécessaire. Le contexte original de l'apprentissage est à considérer. Premièrement, pour sa charge cognitive supérieure aux études précédentes, la charge cognitive et la vergence accommodative semblent liées (F. Daniel & Kapoula, 2019), ainsi que la fatigue visuelle et la fatigue cognitive (Malik & Amin, 2017). Deuxièmement, en raison de sa validité écologique car les travaux précédents sont généralement fondamentaux, utilisant des tests psychophysiques ou similaires. Les HMDs sont déjà utilisés par des professionnels dont les contenus sont l'apprentissage sans avoir une vision claire des limites ergonomiques (fatigue visuelle) (Biggs *et al.*, 2018). Tester la stéréoscopie cyclique permettrait également d'apporter des données sur la différence entre Cai *et al.* (l'activation de la stéréopsie par les images stéréoscopiques fatigue visuellement (T. Cai *et al.*, 2017)) et Chen *et al.* (le maintien de la stéréopsie fatigue (C. Chen *et al.*, 2017a)). Nous traitons ces problématiques via notre seconde expérience.

2.5 CONCLUSIONS ET APPORTS NECESSAIRES

Cet état de l'art s'est concentré sur 26 sous-questions de recherches réparties sur 3 parties : serious game et réalité virtuelle ; système visuel humain, VR et stéréoscopie ; la fatigue visuelle et sa diminution.

Dans la première partie, nous avons établi que les serious games sont efficaces pour apprendre mais documenter l'état des preuves est nécessaire et plus de données empiriques sont requises. La réalité virtuelle s'avère efficace pour l'apprentissage mais cette efficacité est circonscrite à

des apprentissages donnés. Peu de données expérimentales sont disponibles pour la combinaison serious game-réalité virtuelle.

Dans la seconde partie nous avons décrit le fonctionnement du système visuel humain, les fonctionnements de la perception du relief et de la profondeur et comment ces indices sont restitués en HMD via la stéréoscopie.

Dans la troisième partie, nous avons présenté les symptômes et effets secondaires causés par les HMDs et la stéréoscopie. La fatigue visuelle causée par le conflit entre accommodation et vergence est un enjeu ergonomique de première importance. Or, peu d'études avec des HMDs de nouvelle génération existent. Par ailleurs, des preuves invitent à considérer des liens entre la fatigue visuelle et la charge cognitive. Une fatigue visuelle pourrait ainsi abaisser les capacités de mémoire de travail des apprenants : dans notre cas un HMD affichant de la stéréoscopie.

Cet état de l'art nous a permis d'identifier et de transposer nos questions de recherche (voir section 1.2) en apports nécessaires :

- [A1] Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage du SG, de la VR et la combinaison SG-VR
- [A2] Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage avec l'affichage stéréoscopique en HMD
- [A3] Évaluer la fatigue visuelle lors de l'affichage de stéréoscopie avec la nouvelle génération d'HMDs dans un contexte écologique : l'apprentissage
- [A4] Tester des solutions de réduction du stress visuel implémentables avec la plupart des HMDs disponibles sur le marché
- [A5] Questionner le lien entre fatigue visuelle et charge cognitive pour en tirer les problématiques sur l'apprentissage avec des HMDs

Nous traitons ces 5 apports nécessaires en 4 temps dans la partie résultats :

- Dans un premier temps, nous opérons à une revue des preuves d'efficacité d'apprentissage avec le serious game, la réalité virtuelle, leur combinaison puis la stéréoscopie.
- Dans un second temps, nous restituons une première expérience. Elle s'attèle à mesurer la fatigue visuelle avec un modèle de HMD de nouvelle génération comparée à un PC avec le même serious game d'un dispositif à l'autre. Elle mesure également l'influence de la stéréoscopie ou son absence en HMD. Dans chaque configuration, l'apprentissage est également mesuré pour être comparé entre dispositif et type d'images.
- Dans un troisième temps, nous restituons une seconde expérience. Sur la base des résultats obtenus en expérience 1, nous testons une méthode pour réduire la fatigue visuelle : la stéréoscopie cyclique. Le serious game employé est le même que lors de la précédente expérience et l'apprentissage est mesuré.
- Dans un quatrième temps, nous croisons les preuves recueillies lors de l'état de l'art concernant les liens entre fatigue visuelle et charge cognitive avec nos résultats expérimentaux. Des apports théoriques sur la fatigue visuelle en sont tirés.

La prochaine partie présente les matériels et méthodes employés pour la revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage et les apports expérimentaux de cette thèse.

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 INTRODUCTION ET CONTRAINTES

Nous avons précisé 5 questions de recherche (voir section 1.2) traduites en apports nécessaires (voir section 2.5). En premier lieu, nous avons mené une revue de la littérature pour établir les preuves d'efficacité d'apprentissage avec le SG, la VR, les deux combinés puis la S3D. Ensuite, nous avons mené 2 expériences :

- **Expérience 1** : mesure de la fatigue visuelle et de l'apprentissage. Il s'agit de la comparaison du dispositif (PC ou HMD) et de l'imagerie (bi-oculaire ou binoculaire ou binoculaire avec parallaxe excessive)
- **Expérience 2** : mesure de l'efficacité de la stéréoscopie cyclique pour abaisser la fatigue visuelle et de l'apprentissage dans ces conditions. Il s'agit de la comparaison de l'imagerie (binoculaire, stéréoscopie cyclique toutes les 1 minutes ou toutes les 3 minutes)

Enfin, nous avons procédé à une revue critique et une démonstration des liens entre la fatigue visuelle et la charge cognitive.

La production de nos 5 apports implique l'évaluation, donc la quantification. Dans notre cas il s'agit de mesurer : l'apprentissage, la fatigue visuelle et la qualité d'expérience. Une contrainte supplémentaire concerne le niveau de rigueur de l'approche expérimentale afin d'opérer ces mesures. Sur la base de notre analyse de l'état de l'art et compte tenu de nos contraintes expérimentales, nous avons sélectionnés un ensemble de mesures pour les 2 expériences réalisées :

- Nous mesurons l'apprentissage avec la performance et la rétention via les scores, les bonnes/mauvaises réponses et le temps de réponse des serious games.
- Nous mesurons la fatigue visuelle avec 6 mesures optométriques (Acuité Visuelle, Tâche de fusion anaglyphes, Point de fusion et de rupture, Acuité Stéréoscopique, Rapidité d'accommodation, Punctum proximum d'accommodation).
- Nous mesurons la qualité d'expérience via 3 questionnaires (Présence, Flow et Inconfort Visuel).
- Nous testons la stéréoscopie cyclique afin de réduire la fatigue visuelle.
- Nous employons un serious games : Mon entretien d'embauche. Il est affiché sur un Samsung Gear VR avec un Samsung Galaxy 6.

Les 2 expériences respectent les standards éthiques des expériences scientifiques relatives aux projets de recherche non-interventionnelles impliquant la personne humaine. À ce titre, chaque expérience a fait l'objet d'un avis favorable d'un CER indépendant. De plus, notre recherche se réalise dans un cadre appliqué, écologique et dans la dynamique de pouvoir employer ces tests dans l'entreprise d'accueil afin d'instaurer des méthodes d'évaluation des contenus créés. À ce titre, les contraintes suivantes s'appliquent :

- mesures non invasives,
- mesures à bas coût, ne nécessitant pas de matériel spécifique

- mesures rapides et simples à mettre en œuvre, y compris par du personnel non scientifique,
- mesures employées dans de précédentes expériences afin de garantir la comparabilité des données recueillies.

Considérant ces contraintes, nous décrivons les stratégies retenues dans les prochaines sections.

3.2 REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR L'EFFICACITÉ D'APPRENTISSAGE

3.2.1 Méthode de revue

Nous employons une méthodologie de revue la plus systématique et reproductible possible telle que préconisée dans la littérature (Pautasso, 2013 ; Stratton, 2016). Nous opérons aux recherches d'article en langue anglaise. Nous favorisons les « reviews », « overviews », « meta-analysis », « systematic reviews » pour relater l'état des connaissances et son historicité. Puis nous conduisons nos revues en complément de ces vues d'ensemble apportées par de précédents travaux.

3.2.2 Bases de données interrogées

Nous interrogeons 11 bases de données en nous focalisant sur celles pluridisciplinaires, spécialisées en psychologie, en informatique et en apprentissage :

- Scopus,
- Science Direct Elsevier,
- PubMed,
- PsycINFO,
- IEEE Xplore,
- ACM: Association for Computing Machinery Digital Library,
- CiteSeerX,
- arXiv,
- ERIC : Educational Resource Information Center,
- Springer Nature,
- Taylor & Francis Group.

3.2.3 Mots clefs recherchés

Pour le Serious Game : Serious Game *OU* Simulation *OU* Game-Based Learning

Pour la réalité Virtuelle : Virtual Reality *OU* Virtual Environment *OU* VR *ET* Learning.

Pour la combinaison SG-VR : Serious Game *OU* Simulation *OU* Game-Based Learning *ET* Virtual Reality *OU* VR *OU* Virtual Environment, tous combinés.

Pour S3D : Stereoscopia *OU* Stereopsis *OU* Stereoscopic Imaging *OU* S3D *OU* 2D versus S3D *ET* Learning *OU* Training *ET* Virtual Reality *OU* Head-Mounted Display.

3.2.4 Critères d'inclusion et d'exclusion

Les critères d'inclusions sont :

- 1) Date de publication. Pour l'efficacité des SG et la VR entre 2008 et 2019. Pour la combinaison SG-VR 2011 et 2019 (le Sony HMZ-T1 était distribué dès 2011). Pour la S3D entre 2015 (sortie du Samsung Gear VR) et 2019,
- 2) Études utilisant des HMDs ou des CAVES,
- 3) Études nécessitant un apprentissage explicite.

Les critères d'exclusion sont similaires à chaque revue :

- 1) Études n'utilisant pas les mots clefs dans le titre ou dans l'abstract,
- 2) Études ne décrivant pas leurs hypothèses,
- 3) Études ne décrivant pas leur matériels et méthodes assez rigoureusement,
- 4) Études incluant uniquement des enfants (nous nous concentrons sur les adultes),
- 5) Études n'assignant pas au hasard les sujets aux conditions,
- 6) Publications redondantes,
- 7) Études avec des participants neuro-atypique ou non sains (réhabilitation, thérapie).
- 8) Études mesurant uniquement des aspects subjectifs.

3.3 MESURE DE L'APPRENTISSAGE

Par la capacité de récupérer les traces d'apprentissage en jeu, nous allons concentrer notre mesure de l'apprentissage sur la performance via : les temps de réponse, les scores, les bonnes et mauvaises réponses. Nous considérons qu'un apprentissage correspond à un meilleur score d'une partie du serious game (voir section 2.1.4.2) à l'autre (mémoire court terme des bonnes ou mauvaises réponses obtenues) et/ou un temps moins long de réponse. Il s'agit modèle d'évaluation « formative » (Boston, 2002). Ce type d'approche est de plus en plus courant dans la littérature autour du Serious Game (Bellotti *et al.*, 2013) et est assimilable à une performance d'accomplissement de tâches dans d'autres paradigmes expérimentaux. Nous référant à la cartographie des moyens d'évaluation en Serious Game, proposée par Caballero-Hernández *et al.*, cette approche est souvent employée (Caballero-Hernández, Palomo-Duarte, & Doderó, 2017). Nous mesurons également la rétention en remployant le même SG-VR après plusieurs semaines (voir section 3.2.3). Via cette méthode, un apprentissage est considéré comme une mémorisation des bonnes réponses à donner dans le serious game *Mon entretien d'embauche*.

3.4 MESURE DE LA FATIGUE VISUELLE

Comme établis en section 2.3.4.3 de l'état de l'art, nous procédons à des tests optométriques car cette méthode est la plus adaptée compte tenue de nos contraintes, du paradigme expérimental et du modèle de HMD employé. Nous mesurons les paramètres suivants : Acuité stéréoscopique, Acuité visuelle, Amplitude de vergence (hétérophorie éventuelle), Point de fusion et de Rupture de fusion, Rapidité d'accommodation et Punctum Proximum d'Accommodation. Ces mesures renseignent sur l'état du système de convergence, d'accommodation et donc, indirectement, de l'état des muscles oculomoteurs (voir section 2.2.2.1). Ces variables sont mesurées comme suit et répondent à des standards cliniques (voir Tableau 9) :

- 1) L'**Acuité stéréoscopique** est mesurée avec le TNO, présenté 40 cm : voir Figure 38. Le sujet doit déclarer l'orientation vers laquelle un cercle est ouvert. L'avantage du TNO est que les stimuli sont impossibles (en théorie) à détecter en vision monoculaire avec

des points placés aléatoirement. Ainsi, les biais impliquant le sujet détectant le relief avant la mise en œuvre du test (lunettes chromatiques) sont fortement réduits. Avec les filtres, les sujets perçoivent un cercle ouvert dont l'orientation varie à chaque carré. Cette mesure renseigne sur la capacité à percevoir les reliefs (stéréopsie) et peut être considérée comme un indicateur de l'état des capacités de vergence d'une personne.

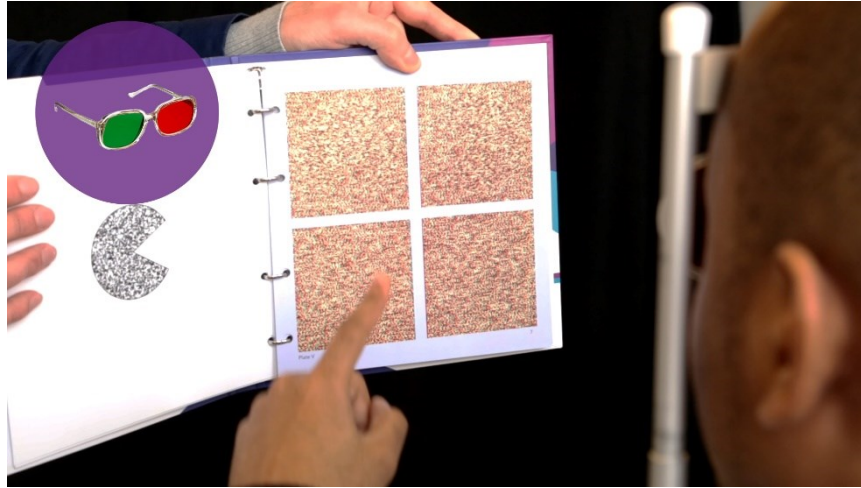


Figure 38 : TNO Test

- 2) L'**Amplitude de vergence** (coordination binoculaire) est mesurée avec le Schober test, présenté à 40 cm : voir Figure 39. Il consiste en un anaglyphe visible avec des filtres rouge/vert. Le sujet doit placer une croix au centre d'un cercle. Le cercle est vu par un œil et la croix par un autre grâce aux filtres. Selon le placement de la croix en rapport avec le cercle, une hétérophorie (déviations de l'axe de la vue au repos) éventuelle est mesurée.



Figure 39 : Test de Schober dans l'application Smartoptometry

- 3) Le **Point de fusion** (disparité positive, négative) et la **Rupture de fusion** (disparité positive, négative) sont mesurés via un Haploscope « virtuel ». L'haploscope est déployé sur iPad, présenté à 40 cm du sujet : voir Figure 40. Il s'agit de tâches de fusion avec des images d'étoiles à 5 branches développée par nos soins via Unity 3D. Une image visible pour un seul œil, pour chaque œil, avec lunettes filtrantes rouge et bleu, doit être

perçue comme fusionnée (une seule image en relief) ou séparée (vision double). La disparité est élevée puis varie pour se rapprocher de zéro (fusion) et le contraire (rupture) pour obtenir les deux mesures. Dès la perception de la fusion puis de la rupture, le sujet appuie sur l'écran. La valeur de disparité est enregistrée en un log.

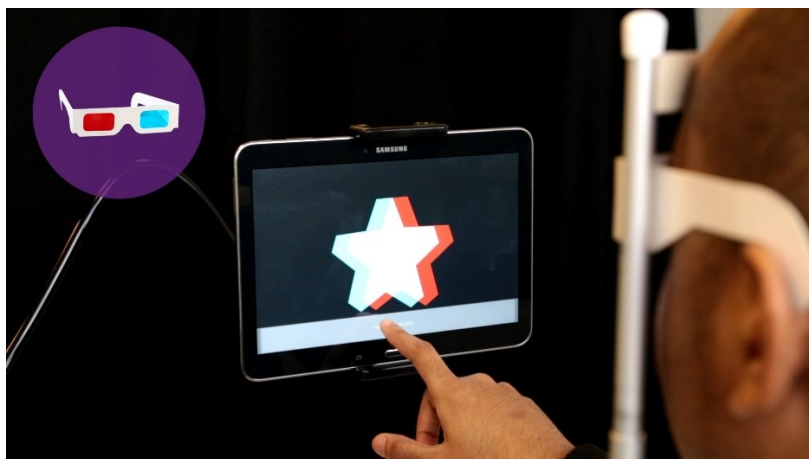


Figure 40 : Haploscope déployé sur tablette

- 4) La **Facilité d'accommodation** est mesurée avec le Flipper Lens Test : voir Figure 41. Le test consiste en des mots, présentés à 40 cm du sujet. Le sujet doit être capable de voir les mots nets tandis que les corrections changent au-dessus de ses yeux via des prismes (+2.00/-2.00). Il indique quand le mot est net ce qui déclenche un changement de mot. La mesure est le nombre de mots vus nets en 1 minute.

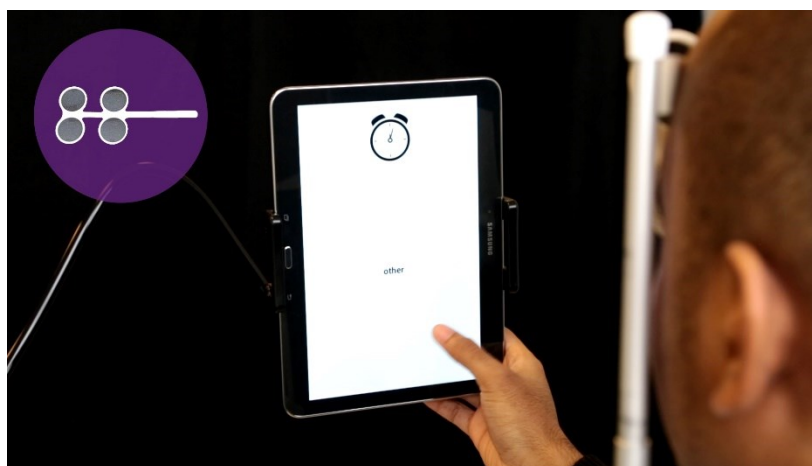


Figure 41 : Flipper Lens Test déployé sur tablette

- 5) Le **Punctum proximum d'accommodation** (point le plus proche auquel la personne accomode) est mesuré avec le Donder's Push-up Test : voir Figure 42. Il s'agit d'un texte sur une feuille papier approchée à vitesse constante jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus voir le texte net. La feuille est à 40 cm puis rapproché à une vitesse de 5 à 7,5 cm par seconde sous un mètre. La mesure est le point le plus proche d'accommodation.

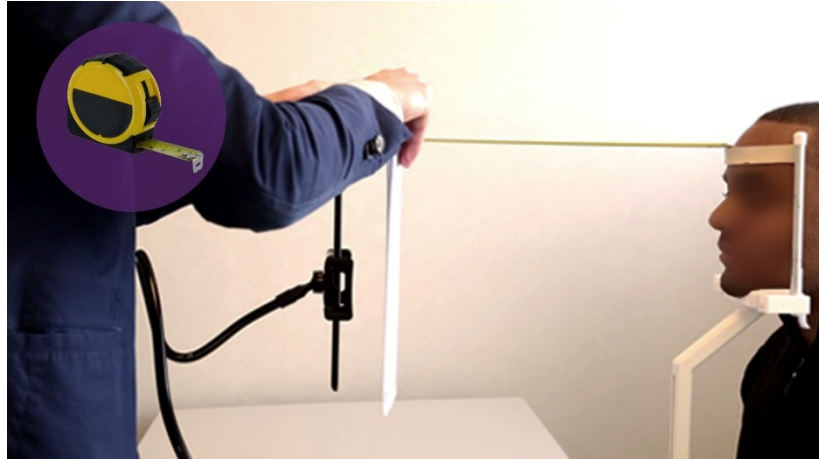


Figure 42 : Donder's Push-Up Test

- 6) L'**Acuité visuelle** est mesurée avec le Test du E de Raskin, présenté à 40 cm du sujet : voir Figure 43. Le sujet détecte l'orientation (aléatoire) de lettres E de dimensions de plus en plus petites.

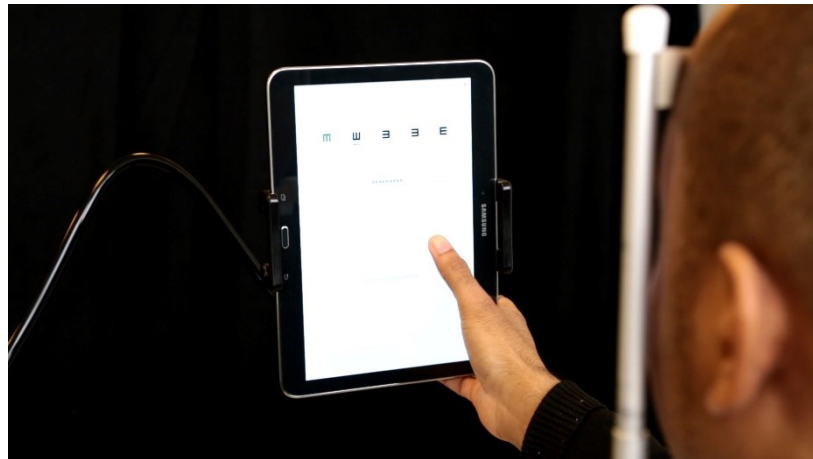


Figure 43 : Test d'acuité visuelle E de Raskin

Les différentes valeurs sont inscrites dans des tableaux. Les mesures 2) 3) et 5) sont obtenus avec l'application mobile « [Smartoptometry](#)© (Slovenia) » : voir Figure 44. Toutes les mesures optométriques sont effectuées avec le sujet sur un repose tête-menton afin d'éviter les mouvements de têtes pouvant faire varier la distance avec les tests opérés.

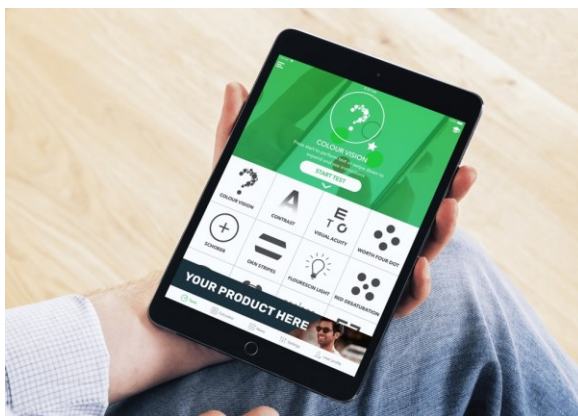


Figure 44 : Smart Optometry © version Tablette (publicité)

Ces 6 variables étudiées possèdent des normes cliniques auxquelles se référer. Elles sont décrites dans le Tableau 8. **Tous les tests nécessitant une tablette ont été opérés avec une Samsung Galaxy.**

Tableau 8 : Normes cliniques des mesures optométriques

Variable testée	Test utilisé	Norme clinique	Référence
Acuité Visuelle (angulaire)	E de Raskin (optotype E sans serif) sur appli SmartOptometry	10/10	Code de la route requiert minimum 5/10 sur au moins un œil
Tâche de fusion anaglyphes	Test de Schober (Anaglyphes) sur appli SmartOptometry (avec lunettes filtres rouge/vert)	Croix vue au centre du cercle	(Amar, 2012)
Point de fusion et de rupture	« Haploscope » avec lunettes filtres rouge/vert sur iPad	Fusion possible 4.93° (croisées) et 1.57° (directes)	(Lambooj <i>et al.</i> , 2009)
Acuité Stéréoscopique	TNO test (avec lunettes filtres rouge/vert)	≥ 30 secondes d'arc d'après Anses ; 60 secondes d'arc d'après Piano <i>et al.</i>	(Anses, 2014 ; Kanski <i>et al.</i> , 2012 ; Piano, Tidbury, & O'Connor, 2016)
Rapidité d'accommodation	Flipper lens test sur 1 minute (avec appli SmartOptometry)	25 mots / 30 secondes, 6 à 12 cycles / minute	(K. M. Miller, York, & Goss, 1996)
Punctum proximum d'accommodation	Donder's Push-up Test	8 - 17 cm (de 15 à 30 ans)	(Bonnac & Meslin, 2006)

3.5 MESURE DE LA QUALITE D'EXPERIENCE

La qualité d'expérience (QoE) est le plus souvent mesurée via questionnaires (Kong & Liu, 2019). Compte tenu de l'hétérogénéité des approches et des méthodes afin d'apprécier la QoE, des personnes exposées au type de contenu que nous testons, nous avons choisi de proposer uniquement des questionnaires. Nous avons retenu ceux ayant été éprouvés auprès de larges populations et dont les liens statistiques entre items ont pu être analysés. Ces questionnaires sont complétés en sélectionnant le degré d'accord avec la question sur des échelles de Likert graduées de 1 à 5.

3.5.1 Présence

La présence est évaluée à travers le questionnaire « Multimodal Presence Scale » de Makransky *et al.* composé de 15 items (traduits en français par nos soins) (Makransky, Lilleholt, & Aaby, 2017). Voir Tableau 9.

Tableau 9 : Items de la Multimodal Presence Scale par Makransky *et al.* (2017) traduit par nos soins

ID	Item français
<u>Présence physique</u>	
PHYS_2	L'environnement virtuel me semblait réel
PHYS_3	J'avais l'impression d'agir dans l'environnement virtuel plutôt que de faire fonctionner quelque chose depuis l'extérieur
PHYS_4	Mon expérience dans l'environnement virtuel semblait cohérente avec mes expériences dans le monde réel
PHYS_5	J'avais la sensation de me trouver dans l'environnement virtuel, "d'être là"
PHYS_10	J'étais complètement captivé par le monde virtuel
<u>Présence Sociale</u>	
SOC_1	J'avais la sensation d'être en présence d'une autre personne dans l'environnement virtuel
SOC_2	J'avais la sensation que les personnes dans l'environnement virtuel étaient conscientes de ma présence
SOC_3	Les personnes dans l'environnement virtuel me semblaient sentiente (consciente et en vie)
SOC_5	Pendant la simulation il y avait des moments où l'interface informatique semblait disparaître et j'avais la sensation de travailler directement avec une autre personne
SOC_7	J'avais la sensation d'interagir avec d'autres personnes dans l'environnement virtuel plutôt qu'une simulation informatique
<u>Présence de soi</u>	
SELF_2	J'avais la sensation que mon corps virtuel était une extension de mon véritable corps dans l'environnement virtuel
SELF_3	Lorsque quelque chose arrivait à mon corps virtuel, j'avais la sensation que cela arrivait à mon véritable corps
SELF_4	J'avais la sensation que mon véritable bras était projeté dans l'environnement virtuel à travers mon corps virtuel

SELF_6	J'avais la sensation que ma véritable main était à l'intérieur de l'environnement virtuel
SELF_7	Pendant la simulation, j'avais la sensation que mon corps virtuel et mon véritable corps étaient devenus les mêmes, un et indivisible

3.5.2 Flow

Le flow est évalué à travers le questionnaire « Flow Short Scale » de Rheinberg, Vollmeyer et Engeser composé de 9 items (traduits en français par nos soins) (Engeser & Rheinberg, 2008). Voir Tableau 10.

Tableau 10 : Items du questionnaire Flow Short Scale de Rheinberg, Vollmeyer et Engeser (2008) traduit par nos soins

ID	Item français
FSS_1	J'avais le sentiment d'avoir le bon niveau de challenge
FSS_2	Mes réflexions / activités étaient fluides et sans interruption
FSS_3	Je ne me rendais pas compte du temps qui passait
FSS_4	Je n'avais aucun mal à me concentrer
FSS_5	Mon esprit était totalement clair
FSS_6	Les bonnes idées et les bons mouvements étaient plutôt intuitifs
FSS_7	Je savais ce que je devais faire à chaque étape
FSS_8	J'avais l'impression de tout avoir sous contrôle
FSS_9	J'étais totalement absorbé par l'expérience

3.5.3 Inconfort visuel

Nous avons sélectionné le questionnaire (traduit en français par nos soins) de Zeri et Livi composé de 11 items (Zeri & Livi, 2015). Voir Tableau 11.

Tableau 11 : Items du questionnaire d'inconfort visuel par Zeri et Livi (2015) traduit par nos soins. DQMRV correspondant à « Dans quelle mesure ressentez-vous »

ID	Item français
VD_1	DQMRV une brûlure au niveau des yeux ?
VD_2	DQMRV une irritation au niveau des yeux ?
VD_3	DQMRV un larmolement au niveau des yeux ?
VD_4	DQMRV une douleur au niveau des yeux ?
VD_5	DQMRV une sécheresse au niveau des yeux ?
VD_6	DQMRV un tiraillement au niveau des yeux ?
VD_7	Dans quelle mesure votre vision est-elle trouble ?
VD_8	Dans quelle mesure votre vision est-elle double ?
VD_9	DQMRV des maux de tête ?
VD_10	DQMRV des vertiges ?
VD_11	DQMRV des nausées ?

3.6 REDUCTION DE LA FATIGUE VISUELLE

La réduction de la fatigue visuelle a été étudiée à travers peu de conditions relevant précisément des SG-VR. La revue de Terzić et Hansard illustre un manque dans la littérature concernant les HMDs et les SG (Terzić & Hansard, 2016). En effet, nombre des solutions proposées se concentrent globalement sur des images statiques ou des vidéos. S'il s'agit d'Environnements Virtuels, ceux-ci sont simples, avec un enjeu esthétique faible et impliquant rarement l'apprentissage. Dans notre contexte, il s'agit de :

- sélectionner les solutions simples à mettre en place,
- ne requérant pas beaucoup de ressources de calcul de la part des appareils,
- garantissant un stress visuel limité,
- n'abaissant pas la qualité graphique de l'environnement virtuel,
- adapté aux interactions proposées donc modulable et s'adaptant à la plupart des HMDs.

À la suite de l'état de l'art sur les méthodes de diminution de la fatigue visuelle, la stéréoscopie cyclique nous apparaît comme intéressante à explorer. Le cerveau humain semble garder les informations de relief en mémoire même lorsque celles-ci ne sont plus perçues par le système visuel (S. Matsuura, 2013). Plus que garder en mémoire les informations de relief, de précédentes études indiquent que la stéréoscopie n'est pas l'indice le plus déterminant pour la perception des distances dans un espace 3D (Ware *et al.*, 1995). Ainsi, fournir de la stéréoscopie que de temps en temps et des images bi-oculaires le reste du temps permettrait d'abaisser le stress visuel. Notre méthode pour générer la stéréoscopie cyclique est présentée dans la section 4.3.1.1.1.

3.7 SERIOUS GAME EN REALITE VIRTUELLE EMPLOYE

Le serious game a été développé via le moteur Unity 3D.

3.7.1 Présentation de mon entretien d'embauche

Le serious game employé pour les expériences 1 & 2 est « Mon entretien d'embauche. » Il est développé par Manzalab pour le compte de Pôle Emploi. Ce jeu est initialement proposé aux inscrits à Pôle Emploi sur la plateforme « Emploi store. » Mon entretien d'embauche consiste à simuler un entretien d'embauche en face à face avec une recruteuse. Ce serious game, combiné à la VR, a été retenu afin de fournir les stimuli car : 1) il implémente un système d'évaluation complet cohérent pédagogiquement avec de précédentes études, 2) il permet une exposition d'environ 15 minutes donc de fournir deux expositions de 30 minutes au total en VR et ainsi s'aligner sur des temps de précédentes études pour assurer la comparabilité des données recueillies, 3) il permet de tester l'apprentissage lié à la mémoire court terme en comparant les 2 résultats successifs, 4) il combine les 4 dimensions de l'apprentissage et les 4 premières dimensions du traitement cognitif de celles-ci, d'après Heer, selon la taxonomie de Bloom révisée d'Anderson et Krathwohl (Heer, 2012). Le but est de mémoriser les réponses les plus appropriées selon les questions de la recruteuse.

Notre motivation à employer ce SG-VR tient au fait que les précédents travaux des pairs se déroulent rarement avec des apprentissages de codes sociaux (voir section 4.1.5).

3.7.2 Interactions et gameplay

L'interaction est sous forme de « Point and select » avec des dialogues : le sujet sélectionne une réponse en pointant le curseur sur une réponse et le maintien jusqu'à ce que celle-ci soit enregistrée. Le joueur peut tourner la caméra à 360°. La vue est à la première personne. Le joueur ne voit aucun élément d'un corps lui appartenant (il ne voit pas son avatar). Le but du jeu est de choisir la meilleure réponse. Il y a, le plus souvent, quatre choix de dialogue possible. Chaque choix est pondéré (score) selon la pertinence en fonction de la question posée, le contexte, les codes de l'entretien d'embauche selon les référentiels (confidentiels, ne pouvant donc pas être présentés ici) de Ressources Humaines de Pôle Emploi. Le modèle pédagogique a été établi par l'équipe d'ingénierie pédagogique de Manzalab en réponse aux attendus de Pôle Emploi. Un score en temps réel évolue selon les choix du joueur. La sélection de la réponse s'effectue en survolant l'une des boîtes de dialogues : en casque en plaçant le pointeur en bougeant la tête, sur PC en plaçant le pointeur en bougeant la souris. Un temps de chargement valide la sélection. Le temps pour répondre est limité : une barre rapetissant symbolise le temps restant. De plus, un feedback direct est donné lors d'un choix de réponse : rouge = réponse non adaptée, orange = réponse moyenne, vert = réponse attendue. Plusieurs scénarii existent, selon le poste. Cette expérience a utilisé le **scénario pour un poste de commercial**.

3.7.3 Scénario et déroulé

Premièrement, un écran permet de lancer la partie et de régler les niveaux de son puis, le sujet entre un identifiant unique. Deuxièmement, un avatar masculin ou féminin doit être sélectionné (voir Figure 45).



Figure 45 : Sélection d'un avatar dans Mon entretien d'embauche

Troisièmement, une fiche de l'offre d'emploi est à lire (voir Figure 46).



Figure 46 : Défilé pour la lecture de l'offre dans Mon entretien d'embauche

Quatrièmement, une fiche des compétences générique pour chaque joueur est préremplie Dans la version distribuée par Pôle Emploi, c'est au joueur de régler ces variables. Dans le cas de l'expérience, cela était prédéfini afin de réduire la variabilité du scénario (voir Figure 47).

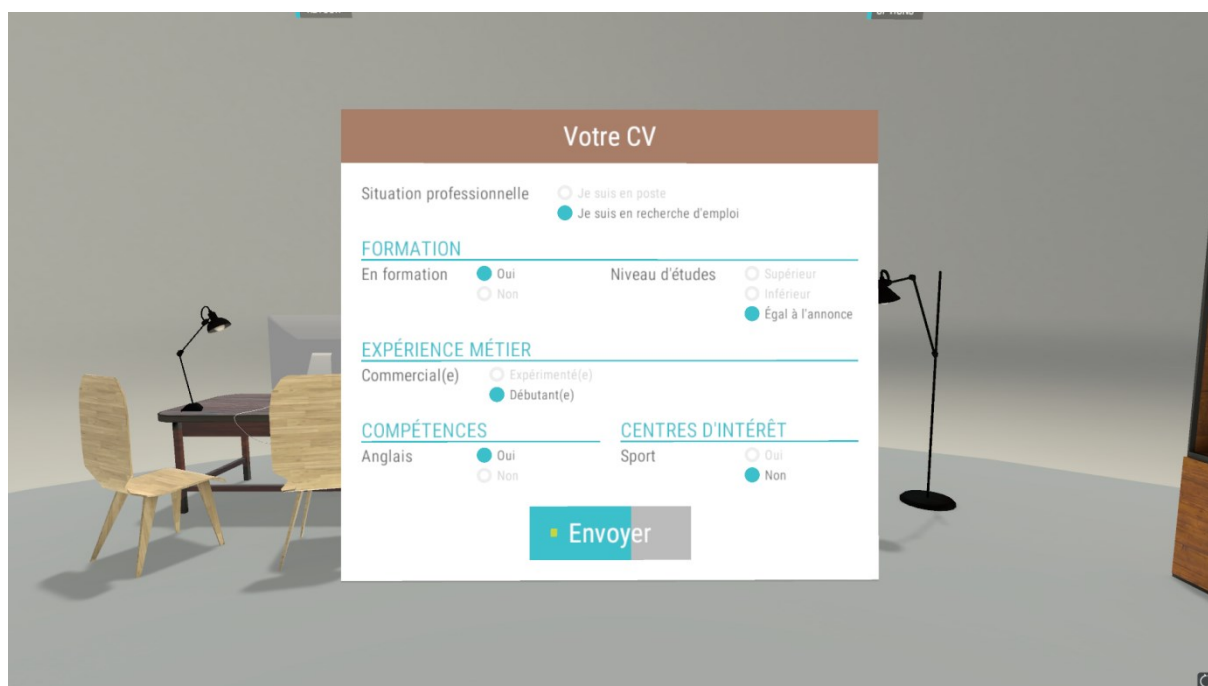


Figure 47 : Compétences prédéfinies équivalent à un CV dans Mon entretien d'embauche

Cinquièmement, le sujet lisait le site web de l'entreprise afin de se renseigner (4 images) successives affichées pendant 15 secondes chacune (voir Figure 48).



Figure 48 : Lecture du site web de l'entreprise (4 images)

Sixièmement, le scénario tel que calibré pour l'expérience afin d'assurer un temps d'exposition approximatif de 15 minutes par partie comporte trois actes :

- 1) Discussion avec un.e ami.e avant l'entretien, femme ou homme selon le choix d'avatar (voir Figure 49)
- 2) Entretien avec la recruteuse (voir Figure 50). Lors du premier et second acte, chaque réponse provoque une coloration du dialogue sélectionné. Le temps de réponse est limité (voir Figure 51). L'appréciation de la recruteuse et le score sont modifiés selon les réponses choisies (voir Figure 52).
- 3) Bilan de l'entretien avec un coach virtuel sur 3 critères de compétence (voir Figure 53). Lors du troisième acte, le coach revient sur les points forts et points faibles du joueur durant l'entretien. Le score final est affiché et un pourcentage d'accomplissement dans les trois compétences est listé : Marketing = capacité à « se vendre », Communication = capacité à communiquer selon les codes attendus lors d'un entretien d'embauche, Conduite = capacité à mener l'entretien.



Figure 49 : Acte I - Discussion avec un ami dans Mon entretien d'embauche (si le joueur est un homme l'amie est une femme ; si le joueur est une femme, l'ami est un homme)



Figure 50 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l'entreprise, une mauvaise réponse a été choisie, la boîte se colore en rouge



Figure 51 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l’entreprise, le temps limité est représenté par une barre bleu qui décroît

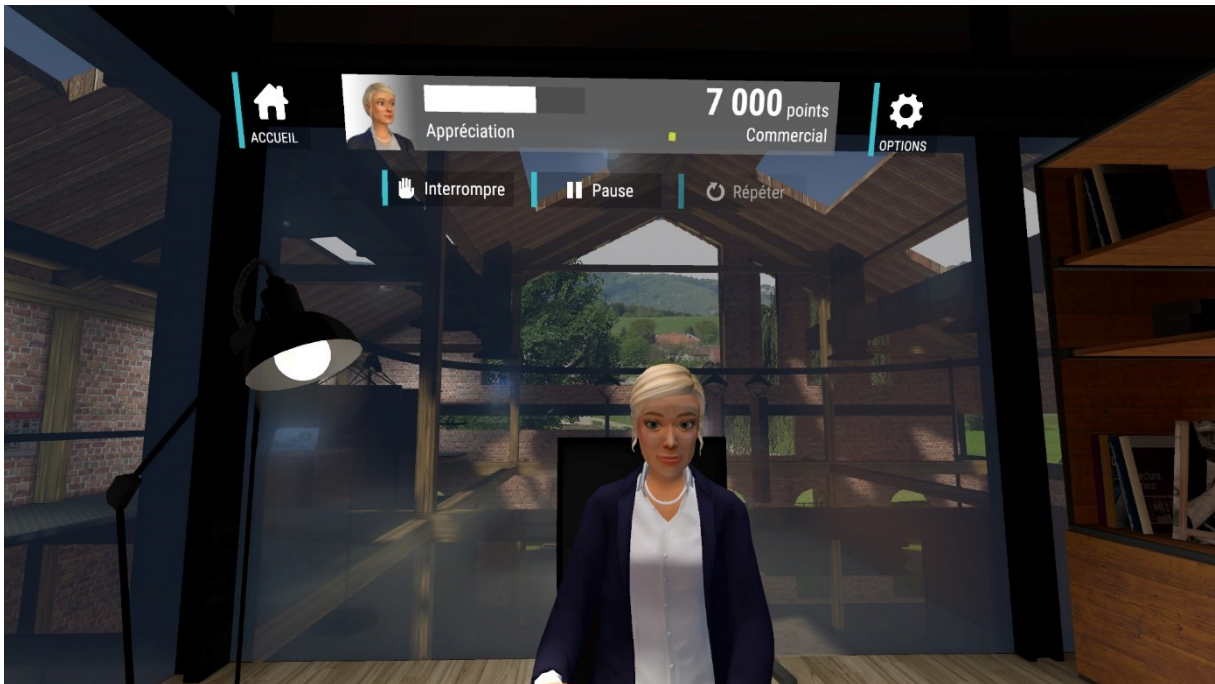


Figure 52 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l’entreprise, une barre d’appréciation représente la perception de la recruteuse, le nombre de point représente le score tous deux dépendent des réponses choisies



Figure 53 : Acte III – Bilan de l’entretien avec le coach (agent virtuel) après l’entretien

3.8 HMD EMPLOYÉ

Modèle HMD : SM-R321 ; Cet HMD requière l’insertion d’un smartphone. Les caractéristiques techniques sont les suivantes : champ de vision (FOV) : 90° ; tracking: 4 degrés de liberté (haut, bas, gauche, droite) avec Accéléromètre et Gyroscope dans le smartphone; poids: 345 grammes. Le casque permet de régler la distance de l’écran avec une molette pour que l’affichage soit net. Voir Figure 54.



Figure 54 : Samsung Gear VR © Samsung

Modèle Smartphone : système d’exploitation : Android 8.1 ; CPU : Samsung Exynos 7 Octa @ 2,1 GHz ; GPU : ARM Mali T760; memory: 3 GB (RAM) ; display : 5.1” Quad HD Super AMOLED. 2560 x 1440 px (577 ppi) ; luminance : 432 cd/m2.

Casque Audio Sony© : Modèle : MDR-ZX110B. Fréquence : 12 à 22 kHz ; diaphragme: 30 millimètres; poids : 120 grammes.

3.9 PARTICIPANTS

Les mêmes critères d'inclusion et d'exclusion ont été observés pour le recrutement des sujets pour les 2 expériences.

3.9.1 Critères d'inclusion

Les sujets sont inclus à la condition d'un âge compris entre 18 et 40 ans. Ceci afin d'éviter qu'une presbytie n'interfère avec les mesures optométriques (40 ans et plus) et pour proposer les stimuli à des personnes dont le système visuel est formé. Les sujets sont issus de la population générale avec une dominante d'étudiants. Si les sujets présentent des troubles de la vision, ceux-ci doivent porter des corrections (lunettes, lentilles de contact).

3.9.2 Critères d'exclusion

Les personnes présentant une presbytie. Les personnes dépassant 40 ans. Les personnes neuro-atypiques (trouble de l'attention, autisme). Les personnes déclarant une pathologie psychiatrique (schizophrénie, psychose, dépression). Les personnes déclarant une épilepsie. Les personnes déclarant une pathologie influençant grandement l'état du système visuel et les perceptions. Les personnes à mobilité réduite.

3.9.3 Recrutement

Sur la base du volontariat avec des affiches, des courriels et la liste RISC du CNRS.

3.10 ÉTHIQUE

L'expérience 1 a été approuvée par le Comité d'Éthique de la Recherche (CER) Paris Descartes sous le numéro : (2017-49) 2018-18 (voir Annexe 2). La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) a été saisie via la méthodologie de référence MR001 « Recherches dans le domaine de la santé avec recueil du consentement », sous le numéro : 2120463 v 0 (voir Annexe 3). La saisine de la CNIL a été possible par le concours de Fabrice LECLERE, Chargé de mission-CIL à l'Université Paris 8. Chaque sujet a une lettre d'information à disposition et signe un formulaire de consentement avant inclusion dans l'expérience.

L'expérience 2 a été approuvée par le CER Paris Descartes sous le numéro : N° 2018 - 51 - SOUCHET (voir Annexe 4). La CNIL a été saisie via le même dossier que l'expérience 1 (les données collectées étaient similaires). Chaque sujet a une lettre d'information à disposition et signe un formulaire de consentement avant inclusion dans l'expérience.

4 RESULTATS

Nous traitons 5 questions de recherches : 1) l'efficacité de communication du savoir selon le dispositif (serious game sur PC ou HMD), 2) l'efficacité de communication du savoir selon le type d'image (bi-oculaire ou binoculaire), 3) la manière dont les yeux humains (des senseurs) sont impactés (fatigue visuelle) par le dispositif donc comment l'information visuelle est traitée par le système visuel, 4) la manière dont la fatigue visuelle impacte l'apprentissage dans le dispositif SG-VR donc comment la baisse de performance du système visuel humain impacte l'apprentissage, 5) l'interaction entre la gestion des conflits sensori-moteurs (conflit accommodation-vergence) du cerveau et les ressources de mémoire de travail (charge cognitive). À l'issue de l'état de l'art, nous avons traduit ces questions de recherche en 5 apports nécessaires : [A1] Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage du SG, de la VR et la combinaison SG-VR ; [A2] Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage avec l'affichage stéréoscopique en HMD ; [A3] Évaluer la fatigue visuelle lors de l'affichage de stéréoscopie avec la nouvelle génération d'HMDs dans un contexte écologique : l'apprentissage ; [A4] Tester des solutions de réduction du stress visuel implémentables avec la plupart des HMDs disponibles sur le marché ; [A5] Questionner le lien entre fatigue visuelle et charge cognitive pour en tirer les problématiques sur l'apprentissage avec des HMDs.

Nous avons réalisé 1 revue, 2 expériences et 1 démonstration du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive afin de produire les 5 apports nécessaires identifiés à l'issue de l'état de l'art (voir section 2.5). La revue des preuves d'efficacité d'apprentissage indique que le serious game, la réalité virtuelle, leur combinaison puis la stéréoscopie sont efficaces pour apprendre. Cependant le niveau de preuve est variable, les expériences nécessitent une plus grande rigueur et plusieurs résultats ne sont pas généralisables. La première expérience mesure la fatigue visuelle avec un modèle de HMD de nouvelle génération comparée à un PC avec le même serious game d'un dispositif à l'autre, l'influence de la stéréoscopie ou son absence en HMD puis l'apprentissage. Cette expérience montre que les courbes d'apprentissage en VR sont plus élevées qu'en PC mais que la fatigue visuelle est plus importante en HMD qu'en PC avec un effet négatif de la S3D. La seconde expérience, sur la base des résultats obtenu en expérience 1, teste une méthode pour réduire la fatigue visuelle : la stéréoscopie cyclique. Le serious game employé est le même que lors de la précédente expérience et l'apprentissage est mesuré. La stéréoscopie cyclique n'abaisse pas la fatigue visuelle et nous identifions que la demande cognitive pour activer la stéréopsie semble conduire à une plus haute fatigue visuelle et un moins bon apprentissage. Sur la base de nos résultats expérimentaux et les preuves recueillies lors de l'état de l'art concernant les liens entre fatigue visuelle et charge cognitive, nous procédons à la démonstration théorique de ce lien et ses implications pour comprendre la fatigue visuelle. Cette section restitue nos apports.

4.1 REVUE DE LA LITTÉRATURE : EFFICACITÉ D'APPRENTISSAGE EN SG, VR, SG-VR ET S3D

Notre état de l'art nous a permis de pointer un manque de vue d'ensemble sur les preuves scientifiques disponibles afin d'attester de l'efficacité ou l'inefficacité d'apprentissage avec SG, VR, les deux combinés et la S3D. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés à restituer les vues d'ensemble (méta-analyses, revues systématiques, revues) de précédents travaux puis nous les complétons avec nos revues selon la méthode décrite en section 3.2. L'objectif est de procéder aux deux premiers apports décrits en section 3.5 : **[A1]** Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage du SG, de la VR et la combinaison SG-VR ; **[A2]** Évaluer l'efficacité / l'inefficacité d'apprentissage avec l'affichage stéréoscopique en HMD. Nous procédons dans cette section à l'évaluation à travers les preuves scientifiques disponibles en dehors de nos propres apports expérimentaux. En partie de cette revue a fait l'objet de 1 communication scientifique : (Souchet, Philippe, & Leroy, 2018a).

4.1.1 Efficacité d'apprentissage avec les SG

Les premiers travaux offrant une vue d'ensemble sur le SG commencent en 2012. La revue de Young *et al.* offre une entrée en matière à propos (M. F. Young, Slota, Cutter, Jalette, Mullin, Lai, Simeoni, Tran, & Yukhymenko, 2012b). Les auteurs proposent des critiques et des analyses claires. Leur travail a été critiqué par Tobias et Fletcher pointant des critères d'inclusion trop restreints. Ils sont eux même à l'origine d'une revue l'année précédente sur ces mêmes problématiques (Tobias & Fletcher, 2012). Une réponse a été adressée par Young *et al.* dans la même année (M. F. Young, Slota, & Lai, 2012a). Ces trois publications témoignent des subtilités sur lesquelles nombre de discussions sont entretenues dans la communauté scientifique lorsqu'il est question de serious games. Young *et al.* traitent essentiellement du jeu vidéo pour apprendre et non des serious games. Tandis que Tobias et Fletcher traitent à la fois des jeux vidéo pour apprendre et des serious game. Young *et al.* analysent (p. 20) que [notre traduction] « *Plusieurs jeux intéressants d'un point de vue éducationnel existent. Cependant, les preuves de leur impact sur la réussite des étudiants sont minces.* » Par ailleurs, Young *et al.* déplorent le manque d'études conduites sur le long terme, la plus longue retenue dans leur revue courant sur 10 semaines (p. 22) tandis que le jeu se poursuit ensuite et en dehors de l'école. Il apparaît que malgré leur revue de 39 études, aucune n'offre de réponses précises à ces éléments. Pour conclure, Young *et al.* en appellent à une amélioration des travaux pour observer l'apport des jeux vidéo pour apprendre. Tobias et Fletcher pointent l'oubli de Young *et al.* de l'apport de la Psychologie Cognitive quant aux avantages ou inconvénients de l'usage des jeux pour apprendre sur la mémoire par exemple (Tobias & Fletcher, 2012). Nous ajoutons que les bases de données interrogées par Young *et al.* excluent une part importante de la littérature (IEEE Xplore, ACM). La revue systématique de Connolly *et al.* consistant à relever les résultats des jeux vidéo à des fins éducatives pointe la difficulté d'effectuer une méta-analyse (Connolly *et al.*, 2012). Le nombre très varié de sources et de données est en cause. Les auteurs indiquent également qu'il n'existe que bien peu d'expériences randomisées. Les expériences sur base de données qualitatives (questionnaires) sont plus nombreuses que celles quantitatives et randomisées. Les auteurs soulignent le besoin de ces données quantitatives.

En 2013 deux méta-analyses sont produites. Wouters *et al.* analysent les effets cognitifs et motivationnels des serious games en incluant 39 études (Wouters *et al.*, 2013). Wouters *et al.* notent que les serious games sont plus efficaces que les autres médias pour apprendre. Un phénomène de rétention (mémoire long terme) est observé par les auteurs. Ils établissent les effets positifs de la répétition des sessions de jeu. Wouters *et al.* invitent les créateurs de serious games à plus se concentrer sur les contenus d'apprentissage (instruction) que sur les graphismes car des graphismes élaborés ou photoréalistes ne guident pas à un meilleur apprentissage. De façon similaire, la part de narration des serious games est invitée à être faible pour ne pas surcharger cognitivement les apprenants. Wouters *et al.* notent que la motivation n'est pas plus élevée avec des serious games qu'avec d'autres médias d'apprentissage. Des différences de performances entre enfants et adultes (meilleure pour les enfants) sont notées dans la méta-analyse en précisant qu'une généralisation n'était pas possible à ce stade. Enfin, ils notent que certaines études empiriques ne recouraient pas à la randomisation dans l'assignation des conditions aux sujets. Selon la méta-analyse de Girard *et al.* incluant 9 études, les preuves de l'efficacité des serious games sur l'apprentissage ne sont pas présentes (Girard, Ecalle, & Magnan, 2013). Les auteurs pointent le manque de qualité méthodologique des études et leur hétérogénéité. Girard *et al.* notent les bénéfices sur l'engagement et la motivation. Les auteurs appellent à plus d'études expérimentales.

La revue de Tobias *et al.* indique un nombre conséquent d'études apportent des données indiquant une supériorité du jeu vidéo sur les autres dispositifs (Tobias, Fletcher, Bediou, Wind, & Chen, 2014). Selon la revue systématique de Clark *et al.*, une seule session serious game peut être aussi efficace que des « méthodes traditionnelles » d'apprentissage, et plusieurs séances seraient plus efficaces (Clark *et al.*, 2016). Ces résultats semblent être confirmés par la méta-analyse de Wouter *et al.* : les SG tendent à se révéler plus efficaces pour l'apprentissage si il y a plusieurs sessions de jeu, plusieurs modalités d'instructions et que le travail en groupe est possible (Wouters *et al.*, 2013). L'un des intérêts du serious game est d'apprendre en faisant (Wouters, 2016). Ces observations semblent autoriser à considérer les SG comme efficaces. Cependant, en 2016, Boyle *et al.* indiquent dans leur systematic review que le besoin d'études expérimentales de meilleure qualité est toujours flagrant (E. A. Boyle *et al.*, 2016).

Selon la revue de de Freitas, la qualité des expériences s'est améliorée entre 2016 et 2018 (de Freitas, 2018). Les serious games commencent à être de plus en plus utilisés. C'est le cas par exemple dans le domaine médical pour lequel Gorbanev *et al.* conduisent une revue systématique. Les auteurs critiquent le manque de clarté sur les stratégies pédagogiques suivies (instructions d'apprentissage) et l'efficacité réelle demeure basse selon les standards d'évaluation des outils en médecine (Gorbanev *et al.*, 2018). Cette critique se retrouve dans la revue de Mayer : malgré des preuves concordantes d'impact positif sur la performance d'apprentissage les études sur l'efficacité du serious game sont toujours appelées à être plus robustes afin d'obtenir un consensus (Mayer, 2019). Mais la méta-analyse de Lamb *et al.* portant sur l'intégration du serious game à l'école conclut à des effets positifs sur la cognition, les émotions et les comportements des élèves (Lamb *et al.*, 2018). Enfin, la méta-analyse de Zhonggen a une conclusion similaire à celle de Lamb *et al.* mais indique qu'il est nécessaire de rester chaque serious game avant de l'intégrer dans un parcours d'apprentissage (Zhonggen, 2019).

Le résultat de notre revue (16 articles inclus), en plus des vues d'ensemble présentées ci-avant, sont contradictoires. 4 études pointent l'inefficacité des serious games mais 12 pointent, au contraire, l'efficacité d'apprentissage. Les 4 études négatives indiquent aucune différence significative entre un contenu présenté par SG comparé aux autres modalités (livres, web, powerpoints) (Boughzala, 2015 ; Giessen, 2015 ; Wrzesien & Raya, 2010). Les raisons avancées sont : des graphismes trop réalistes et une narration trop élaborée tendant à détourner de l'apprentissage. En effet, les apprenants ont alors tendance à détourner leur attention des objectifs d'apprentissage au profit de l'exploration de l'Environnement Virtuel (Virvou & Katsionis, 2008). À l'inverse, les 12 études positives rapportent l'efficacité des serious games : Papastergiou, auprès d'une population de 88 lycéens, propose un jeu afin d'apprendre les principes de la mémoire d'un ordinateur (Papastergiou, 2009). Le groupe A est exposé à un SG tandis que le groupe B est exposé à des instructions sur le web dont les questions et informations sont les mêmes. Les tests d'après exposition montrent un score significativement meilleur pour le groupe A. Par ailleurs, l'auteur observant les élèves rapporte une meilleure attention envers le contenu ainsi qu'une plus grande motivation. Kim et Fengfeng (Heesung Kim & Ke, 2016) (N=132 élèves de CM1 provenant de 5 écoles) comparent une version QCM d'exercices pour apprendre les maths à un SG et rapportent un meilleur apprentissage pour le groupe avec le SG. Un résultat connexe est obtenu par Chittaro, proposant à des élèves d'université d'apprendre la position à adopter et l'appréhension des risques lors d'un écrasement d'avion, rapporte l'obtention de scores maximum par la quasi-totalité des sujets (N=24) exposés au SG comparés aux autres suivant un cours « traditionnel. » De plus, la sensibilisation aux contraintes de sécurités semble également meilleure grâce au SG (Chittaro, 2016). De tels résultats, pouvant être liés à la fidélité visuelle (avec les situations réelles) de l'EV proposé (Veinott *et al.*, 2014), ne sont pas pour autant délimités par la possibilité de proposer des expériences in situ. Par exemple, dans l'étude de Sajana *et al.*, l'apprentissage de concepts en programmations via SG montre une efficacité d'apprentissage notable et l'intérêt de son utilisation auprès d'apprenants novices (N=20) (A, Bijlani, & Jayakrishnan, 2015). Des résultats indiquant une tendance à une meilleure efficacité d'apprentissage en SG pour l'apprentissage des maths se retrouvent dans l'étude de Gallear *et al.* et montrent l'intérêt de tels dispositifs pour l'acquisition de savoirs fondamentaux (Gallear, Lamas, & Stewart, 2014). Cependant, comparé à une interface hypertexte simple, un SG pourrait conduire à une charge cognitive plus élevée (Schrader & Bastiaens, 2012). Les SG procurent une différence de motivation à apprendre (Calderon, Ruiz, & Orta, 2017) et un grand engagement (Yichuan Wang, Rajan, Sankar, & Raju, 2017) par rapport à d'autres modalités. Les SG complètent d'autres média d'enseignement avec des cas pratiques simulant des situations in situ, ils sont reçus positivement (Babu, McLain, Bijlani, Jayakrishnan, & Bhavani, 2016 ; Tantan, Lang, & Boughzala, 2016 ; Veziridis, Karampelas, & Lekea, 2017).

Le serious game s'intègre dans la formation professionnelle ou des adultes dans des domaines variés avec une prégnance du secteur médical (Almeida & Simões, 2019 ; M.-H. Chen *et al.*, 2018 ; Ijaz *et al.*, 2019 ; Loahavilai *et al.*, 2015 ; Mason & Loader, 2019 ; Pallavicini *et al.*, 2018). Nous notons que les apports scientifiques consistent trop souvent à décrire le serious game, l'intention et la démarche de création plutôt que l'efficacité. Cela se trouve par exemple dans un serious game pour apprendre l'algorithmie (Wassila & Tahar, 2012) ou des tests neurophysiologiques (Parsons & Reinebold, 2012). Dans ces deux cas, seule la démarche est décrite

aucune quantification de l'efficacité. Les modalités d'instructions sont très différentes d'un serious game à l'autre, ne considérant pas assez les processus cognitifs des apprenants alors que ces instructions conditionnent la performance des apprenants (Wouters & van Oostendorp, 2013). Les effets socio-cognitifs et socio-affectifs influencent l'efficacité d'apprentissage et sont encore à l'étude (Fourquet-Courbet & Courbet, 2015). La section 2.1.5 portant sur la qualité d'expérience du présent manuscrit les traitent. L'évaluation des serious games eux même (pas l'efficacité d'apprentissage) manque de rigueur et de standardisation (Petri & Wangenheim, 2017).

Nous avons présenté 5 méta-analyses, 4 revues systématiques et 6 revues ainsi que 16 articles expérimentaux publiés entre 2008 et 2019 afin d'identifier le consensus scientifique quant à l'efficacité ou non des serious games pour apprendre. Les effets des serious games sur l'apprentissage apparaissent positifs dans l'ensemble : meilleure motivation (ou équivalente à d'autres modalités), engagement, performance si plusieurs parties sont jouées. Cependant, la littérature scientifique pointe la faiblesse des apports empiriques : biais, reproductibilité, taille d'échantillons, randomisation. Ainsi, ce consensus autour du serious game se base sur des preuves encore fragiles mais nombreuses. Il apparaît que plus d'apports empiriques soient nécessaires afin d'apprécier l'efficacité d'apprentissage avec les serious games.

4.1.2 Efficacité d'apprentissage avec la VR

La revue de Mikropoulos et Natsis, se basant sur 53 articles, relève une efficacité de la VR équivalente voire supérieure à d'autres modalités d'apprentissage mais pointe le manque de résultats expérimentaux robustes (Mikropoulos & Natsis, 2011). Dans leur revue, de Freina et Ott concluent que la VR peut comporter de grands avantages pour l'apprentissage car conduisant à une meilleure motivation des apprenants (Freina & Ott, 2015). La vue d'ensemble de Slater et Sanchez-Vives pointe les avantages du dispositif qu'est la VR pour apprendre : incarner, agir, répéter mais ne se base que sur peu de preuves expérimentales (Slater & Sanchez-Vives, 2016). La méta-analyse de Alaker *et al.* se concentre sur l'apprentissage de la laparoscopie en VR comparé à aucun apprentissage, des vidéos, des simulations réelle sur la base de plusieurs années d'apports expérimentaux (Alaker *et al.*, 2016). Ils concluent que majoritairement, les preuves expérimentales rapportent une supériorité de la VR sur les autres modalités. La revue systématique de Kavanagh *et al.*, incluant 90 articles, indique que la plupart des études montrent une bonne motivation de l'utilisateur (Kavanagh *et al.*, 2017). Le rapport de Biggs *et al.* relève ce même manque d'apports expérimentaux sur des apprentissages variés afin de statuer sur l'efficacité de la VR sur l'apprentissage (Biggs *et al.*, 2018). Cependant, les auteurs pointent également la faiblesse (méthodologie, résultats) des études et le manque de comparaison de ce dispositif avec d'autres médias pour l'apprentissage. La méta-analyse de Lanier *et al.* porte sur la qualité méthodologique et particulièrement statistique des études en VR (Lanier *et al.*, 2019). Ils alarment sur la nécessité d'une amélioration drastique. Les apports expérimentaux sont hétérogènes par : la taille des échantillons de sujets, la qualité des méthodes de recherche employées, les mesures d'apprentissage, les secteurs d'activités concernés, les environnements virtuels utilisés. Ainsi, plus d'études expérimentales sont systématiquement requises par la communauté scientifique. Ce manque de données et donc l'impossibilité de conduire vers un premier consensus sur l'efficacité de la VR peut s'expliquer par son retour récent dans les

laboratoires travaillant sur l'apprentissage, retour ralenti par le coût significatif des HMDs. Cependant, les études expérimentales sont de plus en plus nombreuses sur les questions d'apprentissage avec la VR.

Le résultat de notre revue (10 articles inclus), en plus des vues d'ensemble présentées ci-avant, vont globalement dans le sens d'une supériorité de la VR sur d'autres modalités malgré des résultats d'efficacité d'apprentissage parfois équivalent ou inférieurs :

L'étude de Moreno et Mayer divisée en deux expériences (exp1 N=89, exp2 N=75), indique un sentiment de présence plus élevé plus les conditions sont immersives (d'écran d'ordinateur à HMD avec sujet marchant) (R. Moreno & Mayer, 2002). Cependant, aucune différence significative sur l'apprentissage (botanique) n'est observable. Des dispositifs tels que des salles immersives soulèvent l'intérêt d'élèves (classe de N=14) apprenant en chimie (molécules) via des animations lorsque comparé à un écran d'ordinateur (Limniou, Roberts, & Papadopoulos, 2008). Limniou *et al.* rapportent l'appréciation positive des élèves sur les capacités d'interaction plus intéressantes en CAVE™ et notamment avec le professeur fournissant les explications. Huang *et al.* proposent à 167 étudiants une interface pour apprendre les organes humains (« 3D Human Organ Learning System ») (H.-M. Huang, Rauch, & Liaw, 2010). Les élèves expriment un retour positif (sur base des 4 critères : imagination, immersion, interaction et apprentissage collaboratif). Ragan *et al.* demandent aux sujets (N=41) de mémoriser le placement d'objets et la procédure afin de les placer. Plus l'apprenant accède à un haut degré d'immersion, plus sa performance (score et temps) est meilleure (Ragan, 2010). Ragan *et al.* pointent que de tels résultats sont fortement liés au type d'apprentissage dans lequel la spatialisation est centrale mais ils émettent l'hypothèse que tout type d'apprentissage pourrait bénéficier d'un haut degré d'immersion. L'expérience de Ray et Deb note une différence significative de meilleure performance d'apprentissage grâce à la VR utilisée via des CardBoard™ et les propres Smartphones des apprenants (Ray & Deb, 2016). Le but est d'apprendre le fonctionnement des Microcontrôleur et des cartes Arduino (électronique). Le groupe A (contrôle, N=20) reçoit les explications orales avec les supports habituels : au tableau blanc et avec un PowerPoint® via projecteur, tandis que le groupe B (investigué, N=20), en plus des explications orales similaires, se sert des CardBoard™ pour accéder à d'autres ressources. L'expérience se déroule sur 2 mois avec 2 sessions par semaine (16 sessions au total). Harman *et al.* comparent la performance (N=62) à décrire et accomplir des tâches d'enregistrement dans un aéroport entre PC et VR (Oculus Rift) (Harman, Brown, & Johnson, 2017). Les sujets décrivent mieux et plus de tâches en VR. Teranishi et Yamagishi testent un environnement d'apprentissage de l'assemblage d'un PC en VR (Oculus DK2) auprès de 6 participants (Teranishi & Yamagishi, 2017). Les auteurs mesurent la mémorisation des noms des pièces et de l'emplacement des pièces puis évaluent l'utilisabilité. Teranishi et Yamagishi montre que l'emplacement des pièces de PC sont meilleures en VR qu'avec un manuel papier. Parong et Mayer comparent la présentation de diapositives sur PC à une simulation en VR (HTC Vive) pour apprendre le fonctionnement des cellules dans le système sanguin avec des étudiants (N=55) (Parong & Mayer, 2018). Les sujets via questionnaires rapportent de meilleurs engagements et intérêt en VR. Cependant, les scores au test de mémorisation et compréhension sont meilleurs avec les diapositives sur PC qu'avec la simulation en VR. Parong et Mayer indiquent que la VR peut créer tellement de traitements

cognitifs superflus que l'apprenant n'a plus suffisamment de ressources cognitives pour apprendre l'essentiel de la leçon. Il y a donc saturation de la mémoire de travail et une charge cognitive trop importante en VR dans ce cas. Cependant, les instructions sont très différentes d'une condition à l'autre. Markowitz *et al.* testent auprès de différents publics (lycées, étudiants, adultes) une expérience d'apprentissage des mécanismes, conséquences du réchauffement climatique et de l'acidification des océans en VR (Markowitz, Laha, Perone, Pea, & Bailenson, 2018). Les tests se déroulent en 4 expériences (2 en laboratoire : exp1 N=19, exp2 N=47, 2 en salon : exp3 N=167, exp4 N=44) auprès de 270 participants au total. Les utilisateurs peuvent se déplacer librement sous l'eau. Des variations mineures dans chaque expérience sont opérées. Markowitz *et al.* notent un gain en connaissance ou en curiosité relatifs au changement climatique. Les résultats montrent parfois des attitudes plus positives envers l'environnement lorsque des tests sont opérés comparant avant et après exposition à la VR. Markowitz *et al.* concluent que plus les utilisateurs ont exploré spatialement l'environnement virtuel, plus ils présentent un apprentissage concernant l'acidification des océans. Krokos *et al.* demandent à 40 participants de réaliser des exercices de mémorisation soit devant un PC, soit en VR (Oculus DK2) dans un palais mental (Krokos, Plaisant, & Varshney, 2018). Les participants doivent retenir l'emplacement de visages de célébrités ou personnages connus dans le palais mental. Krokos *et al.* rapportent une meilleure efficacité de mémorisation (+8,8 %) en VR comparé à PC.

Nous avons présenté 2 méta-analyses, 1 revues systématiques, 3 revues, 1 rapport puis 10 expériences évaluant l'efficacité d'apprentissage de la VR. Les performances (essentiellement la mémorisation) sont le plus souvent équivalentes ou meilleures en VR qu'avec d'autres modalités (PC, Power Points, manuel papier...). Les 10 études incluses dans notre revue dénombrent en moyenne $61,86 \pm 49,81$ sujets. Les apprentissages évalués par ces 10 articles sont : la chimie (molécules), les organes humains, la botanique, électronique, enregistrement à l'aéroport, fonctionnement des cellules, l'écologie (réchauffement climatique et acidification des océans), mémorisation dans un palais mental et assemblage de PC. On constate une prédominance des apprentissages de matières scientifiques et d'apprentissage procédural. Sur ces 10 expériences, l'acceptation par les apprenants est souvent mesurée. Celle-ci est globalement positive. Les auteurs notent de meilleurs immersion, engagement, présence et motivations (voir section 2.1.5) en VR qu'avec d'autres modalités. Nous constatons également qu'une part importante des expériences menées en 2019 portent sur l'apprentissage dans le cadre de la réhabilitation ou à l'école avec les enfants (études exclues avec nos critères).

Une caractéristique commune de la plupart des environnements virtuels testés est la nécessité de spatialisation des connaissances à acquérir : apprentissage procédural (assembler des pièces), anatomie, éléments à mémoriser dans l'espace. Nous n'avons pas trouvé d'études expérimentales pour des apprentissages comportementaux (e.g. : conventions sociales selon un contexte donné). Cela peut s'expliquer par une nécessité d'interaction avec les objets d'apprentissage perçue comme moins utile. Plus d'études avec une qualité méthodologique élevée sont requises dans les précédents apports (Jensen & Konradsen, 2018). L'avantage pour tester les bénéfices de la VR sur l'apprentissage est que des études peuvent être conduites de manière robuste hors des seuls murs des laboratoires de recherche (Mottelson & Hornbæk, 2017).

4.1.3 Efficacité d'apprentissage avec la Combinaison SG-VR

Stone *et al.* conduisent une revue d'une dizaine d'Environnements Virtuels. Les auteurs notent que l'utilisation de tels dispositifs pour l'aérospatial sont associés à : un bon apprentissage, un coût de formation attractif, et un temps de formation court (Stone, Panfilov, & Shukshunov, 2011). La revue systématique de Feng *et al.* porte exclusivement sur les formations à l'évacuation. Elle inclut 15 articles (11 sur les incendies, 3 en avion et navettes, 1 sur les tremblements de terre) (Z. Feng *et al.*, 2018). Certains de ces articles sont repris dans notre revue ci-dessous. Sur la base des 15 articles, Feng *et al.* rapportent que les SG-VR fournissent une connaissance considérable de l'évacuation, avec de meilleures performances en termes de rétention des connaissances que les approches traditionnelles (souvent des fiches). Selon les auteurs, les sujets avaient une mauvaise performance en cas d'incendie. Ils corrélaient ce résultat à un stress physiologique et psychologique élevé.

La revue de Menin *et al.* porte sur les simulations en VR intégrant des dimensions gamifiées. Elle inclut 51 articles, dont 46 traitant de simulations (Menin *et al.*, 2018). Menin *et al.* explicitent le lien entre simulation et serious game, en accord avec la *Comprehensive Serious Game Taxonomy* (De Lope & Medina, 2016). Les auteurs restituent qu'en général les joueurs appréciaient la simulation du fait de l'immersion ou l'adoption d'aspects gamifiés. Menin *et al.* notent que l'évaluation de l'efficacité d'apprentissage en simulation VR se base sur la comparaison avec des méthodes traditionnelles. Ils y décèlent un biais pour les résultats car cela implique de comparer des médias très différents. Menin *et al.* documentent que les 51 études montrent pour la plupart une supériorité de la VR sur les autres modalités. Les auteurs indiquent que la meilleure approche pour apprécier l'efficacité d'expérience en VR serait de comparer la simulation dans différentes configurations immersives : en variant les stimuli et les caractéristiques de matériels (PC versus VR par exemple amis avec le même contenu).

Le résultat de notre revue (18 articles inclus), en plus des vues d'ensemble présentées ci-avant, vont globalement dans le sens d'une supériorité de la SG-VR sur d'autres modalités :

Schmoll *et al.* exposent 30 lycéens à un EV via le HMD Sony® HMZ-T1™ ou via un dispositif PC-souris pour apprendre une langue étrangère (Schmoll, Veit, & Roy, 2013). Il en ressort que la rétention est meilleure en VR que sur PC sur le court terme mais moins bonne sur le long terme (4 semaines après l'expérimentation). Kozhevnikov *et al.* testent un serious game afin d'apprendre la physique du concept de mouvement relatif avec 37 participants (Kozhevnikov & Gurlitt, 2013). Le jeu est testé sur PC ou VR (nVisor SX60) et selon le nombre de cours sur la physique auxquels les sujets ont participé avant de jouer au serious game. Kozhevnikov *et al.* indiquent que le nombre de cours préalables n'ont pas influencé positivement l'apprentissage. Quand exposés à la VR, les sujets ont de meilleurs résultats. Selon les auteurs, la supériorité de la VR peut s'expliquer par la vue à la première personne et egocentrique permettant la manipulation pour les mouvements 2D.

Hupont *et al.* proposent un couplage SG-VR à 22 participants se préparant à passer un permis de chariot élévateur (Hupont, Gracia, Sanagustin, & Gracia, 2015). Le SG-VR conduit à des résultats positifs sur la qualité d'expérience des apprenants. Hupont *et al.* comparent leur SG déployé sur écran d'ordinateur 2D au même contenu sur un HMD Oculus rift™. Ainsi,

subjectivement, la VR apporterait une meilleure immersion que les écrans, facilitant l'apprentissage. Webster forme 140 soldats à la prévention et au contrôle de la corrosion des matériaux (Webster, 2015). Le groupe contrôle (N = 115) suit une formation traditionnelle avec support PowerPoint® et questionnaires tandis que le groupe investigué (N = 25) suit une formation à travers un EV en VR via un HMD Sony® HMZ-T1™. Les résultats de son expérience indiquent un meilleur apprentissage en VR qu'en formation traditionnelle. Une explication pour un tel résultat, et comme limite de l'étude, évoquée par Webster porte sur la conception très différente des instructions entre les deux conditions (à l'avantage de l'EV).

Moro *et al.* exposent 20 participants à deux différents HMDs : lié à un smartphone (Samsung Gear VR) ou à un PC (Oculus Rift CV1), pour comparer la performance d'apprentissage de l'anatomie de la colonne vertébrale (Moro, Štromberga, & Stirling, 2017). Les résultats après exposition sont équivalents pour les deux groupes. Cependant, Moro *et al.* notent que les sujets exposés au Samsung Gear VR rapportent des effets indésirables plus élevées (cybersickness et fatigue visuelle) notamment de vision double pour 40 % de ce groupe. Buttussi et Chittaro proposent une formation pour les procédures de sécurité en cabine d'avion (Buttussi & Chittaro, 2017) avec 96 participants. Il s'agit de déterminer si l'efficacité d'apprentissage varie selon le médium utilisé pour proposer un serious game simulant une situation d'accident en avion (atterrissage sur l'eau). Trois groupes (N=32 chacun) sont exposés à des médiums différents : Groupe A à un Asus® VX279H™ 27", Groupe B à un Sony® HMZ-T3W™, groupe C à un Oculus® Rift DK2™. Aucune différence significative d'apprentissage n'est trouvée. Cependant, le groupe C rapporte (questionnaires) une plus grande présence et un plus grand engagement. Le temps d'accomplissement des tâches est le même pour les trois conditions. Gonzales *et al.* testent une simulation de tracteur en VR (Oculus Rift DK2) pour entraîner des conducteurs à se servir correctement de la structure de protection contre le retournement pliable (ROPS) dans les tracteurs avec 127 participants (Gonzalez *et al.*, 2017). Les sujets sont répartis en 3 groupes : groupe 1 (N = 37) : étudiants ayant suivi des « cours de formation à la sécurité », groupe 2 (N = 39) : agriculteurs ayant « une expérience de la conduite de tracteurs », et groupe 3 (n = 51) : personnes « sans expérience de la conduite de tracteurs » issues du monde rural. Le temps de conduite et le nombre d'erreurs (chaque fois que le système de sécurité n'est pas activé par le sujet alors qu'il aurait dû l'être, avec une limite de 8 erreurs) sont mesurées. Gonzalez *et al.* indiquent que le groupe 1 commet moins d'erreurs que les autres groupes, validant l'efficacité de la formation à la sécurité suivie par les étudiants, indépendamment de l'expérience en VR. Les auteurs observent toutefois que l'effet de la VR est plus marqué sur les groupes 2 et 3, non experts en sécurité puisqu'ils observent que la perception du risque et de la sécurité (questionnaire) s'est accrue après l'expérience pour tous les participants, mais beaucoup plus pour les utilisateurs non fréquents de tracteurs.

Ekstrand *et al.* comparent la performance d'apprentissage de l'anatomie du cerveau entre la VR (HTC Vive) et un manuel papier auprès de 64 participants (Ekstrand *et al.*, 2018). Un test de rétention après exposition puis de satisfaction et un autre test de rétention 5 à 9 jours plus tard indiquent que la VR peut constituer un outil supplémentaire efficace pour l'apprentissage de la neuroanatomie. Selon les auteurs, elle réduirait la neurophobie et en augmenterait la rétention des connaissances. Ekstrand *et al.* pointent que l'apprentissage des relations tridimensionnelles

complexes entre les structures neuronales est facilité par la formation dans un environnement virtuel en VR. Sankaranarayanan *et al.* mesurent l'apprentissage sur la prévention des incendies dans les salles d'opération via un SG-VR (Oculus Rift DK2) avec 20 participants (Sankaranarayanan *et al.*, 2018). Les auteurs testent les scores pre- et post-formation en intra-sujets et en inter-sujets. Les deux groupes ont des scores similaires aux tests pré-formation. Un cours est délivré par des chercheurs (15 minutes) et un guide de référence est donné pour tous les sujets. Deux groupes sont formés : groupe contrôle (cours + guide), groupe testé (cours + guide + 5 sessions de simulation en VR). Les tests post-formation (1 semaine après) montrent une meilleure performance du groupe cours + guide + VR comparé en au groupe cours + guide. La répétition de l'apprentissage en VR a donc favorisé l'ancrage des connaissances par rapport à l'absence de répétition pour le groupe contrôle. Butt *et al.* testent un complément à la formation habituelle à la pratique du cathétérisme urinaire en VR auprès d'une population de 20 étudiants en infirmerie (Butt, Kardong-Edgren, & Ellertson, 2018). Deux groupes sont formés (N = 10 chacun) : groupe 1 suit les entraînements habituels avec des simulations « réelles » supervisées par un formateur, le groupe 2 suit les entraînements pratiques en VR (Oculus Rift DK2). Butt *et al.* rapportent que les sujets utilisant le système de VR passent plus de temps à s'exercer et effectuent plus de procédures en une heure que les étudiants pratiquant traditionnellement. Pour autant, les taux de réussite aux tests de suivi entre les groupes étaient identiques à 2 semaines.

Gordon *et al.* testent pour l'apprentissage des mots (noms de potions) un environnement virtuel dans lequel des interactions avec les objets sont possibles : les sujets doivent mémoriser les noms des ingrédients et composer des potions (Gordon, Shea, Noelle, & Balasubramaniam, 2019). Les auteurs réalisent 3 expériences avec des possibilités d'interaction variantes réunissant chacune N=27 participants avec un HMD (HTC Vive). L'apprentissage est terminé lorsque les participants réalisent 20 préparations. Gordon *et al.* montrent un lien entre le sens de l'interaction (à droite ou à gauche) et la vitesse de réponse lorsque des mots doivent être associés à des objets (tâches d'association entre mot et couleur). Cette affordance apparaîtrait même sans la manipulation directe des objets. Gordon *et al.* y voient une démonstration qu'une interaction sensorimotrice naturelle au cours de l'apprentissage des mots donnant lieu à des effets sur le « langage incarné. »

Harvey *et al.* entraînent 57 participants au ball-trap avec un SG-VR (HTC Vive, contrôleurs sur un châssis en plastique créé par imprimante 3D). Deux versions sont comparées : sans assistance ou avec l'assistance de guides visuels colorés : autour des cibles, laser depuis le fusil (Harvey, Selmanović, O'Connor, & Chahin, 2019). Cet apprentissage est qualifié par les auteurs de compétence psychomotrice complexe. L'assistance conduit à de meilleures performances. De façon surprenante, le bénéfice de l'assistance se maintient avec des sujets experts en ball-trap « dans la vraie vie ». Les auteurs pointent les difficultés rencontrées par de précédents travaux concernant l'appréciation des distances et le réglage de la stéréoscopie. Le ball-trap en VR serait donc plus difficile que dans la vraie vie en raison des difficultés à appréhender les distances. L'assistance permettrait de lisser cette difficulté. La question peut alors se poser de la transférabilité de l'apprentissage en VR des non-experts aux conditions réels, les auteurs non pas vérifier ce point. Aksoy *et al.* mènent une étude pilote avec 11 participants pour les former aux premiers secours (Aksoy *et al.*, 2019) avec un SG-VR (HTC Vive). Deux groupes sont formés : groupe

1 (non-experts) = non travailleurs médicaux sans entraînement sur le dispositif avant test (N=6), groupe 2 (experts) = travailleurs médicaux avec entraînement sur le dispositif avant test (N=5). Le serious game consiste en 2 scénarios (bord de mer et métro) dans lesquels les sujets doivent accomplir 10 tâches de premiers secours, chacune rapportant 10 points (score maximum en jeu = 100). En plus des scores, l'oxygénation du cerveau (cortex préfrontal) et la charge cognitive sont mesurés via Imagerie spectroscopique proche infrarouge (fNIRS). Les participants jouent deux fois à 7 jours d'intervalle. Aksoy *et al.* comparent la différence entre les deux essais afin de mesurer l'effet de l'apprentissage. Le groupe 1 (sans entraînement préalable) montre une chute du niveau d'oxygénation ainsi qu'une amélioration des scores significatifs entre la première et la seconde partie. Ce n'est pas le cas pour le groupe 2 : l'oxygénation reste basse et les scores sont élevés dès le premier jeu. Ainsi, le dispositif est efficace pour apprendre les premiers secours et l'effet de cet apprentissage est une chute de l'oxygénation du cerveau (charge cognitive moins élevée). Dans une seconde étude, Aksoy teste le même serious game cette fois-ci pour comparer la performance d'apprentissage entre tablette et VR avec 40 participants non-experts (Aksoy, 2019). Les deux groupes améliorent leur performance aux tests opérés avant et après exposition mais l'apprentissage est meilleur en VR qu'avec une tablette. Le serious game est efficace et l'est plus en VR qu'avec tablette. Feng *et al.* comparent les connaissances de 87 participants sur les comportements à adopter lors d'un tremblement de terre avant et après une formation avec SG-VR (Oculus Rift DK2) (Z. Feng *et al.*, 2019). Les scores (en jeu) et connaissances rapportées (5 questions à l'oral) s'améliorent significativement. Feng *et al.* concluent à l'efficacité du dispositif. Leder *et al.* comparent l'efficacité d'apprentissage à la sécurité, la perception des risques et les choix risqués entre une formation via Power-Point et une formation en VR (CAVE) (Leder, Horlitz, Puschmann, Wittstock, & Schütz, 2019). Avec un premier groupe de 53 participants un meilleur apprentissage est obtenu en VR. Cependant, ce résultat n'est pas reproduit avec un second groupe de 68 participants, malgré des conditions expérimentales similaires. Leder *et al.* concluent qu'il n'est pas justifié d'utiliser la VR (CAVE) pour former à la sécurité car les bénéfices ne sont pas plus élevés qu'avec un Power-Point. Meyer *et al.* comparent l'apprentissage du fonctionnement des cellules humaines entre une vidéo et une simulation en VR (Samsung 8 avec Gear VR), les apprenants recevant un pré-entraînement (fiches avec images et définitions) ou non (Meyer, Omdahl, & Makransky, 2019). Les sujets (N = 118) sont donc divisés en 4 groupes : VR sans pré-formation (N = 31), VR immersive avec pré-formation (N = 29), vidéo sans pré-formation (N = 30) et vidéo avec pré-formation (N = 28). La rétention et le transfert sont testés après exposition via QCM. Le sentiment d'auto-efficacité (c'est à dire la croyance du sujet en sa capacité de réaliser une tâche) et le sentiment de plaisir et l'inconfort sont mesurés via questionnaires après l'expérience. Enfin, 1 semaine plus tard, la rétention et le transfert sont de nouveau testés avec les mêmes QCM. Meyer *et al.* notent que la pré-formation a considérablement accru la rétention et le transfert courts termes dans la condition VR mais que cela n'a pas eu d'impact significatif sur l'apprentissage ou le transfert dans la condition vidéo. De même, la pré-formation augmente de manière significative le sentiment d'auto-efficacité des étudiants lors de l'apprentissage en VR mais pas avec vidéo. En revanche, le plaisir perçu est significativement plus élevé pour les étudiants qui n'avaient pas de pré-formation. La VR est donc plus efficace qu'une vidéo lorsqu'il y a un pré-entraînement. Le plaisir et l'efficacité d'une formation ne semblent pas liés. Oberdörfer *et al.* comparent l'apprentissage de l'application affine (géométrie) pour le développement en

informatique graphique entre PC et VR (HTC Vive) (Oberdörfer & Latoschik, 2019) avec 21 participants. Bien que la qualité d'apprentissage rapportée par les sujets soit meilleure en VR que sur PC, le groupe PC termine plus de niveaux comparés à la VR. Dans cette étude, la VR ne conduit pas à un meilleur apprentissage qu'avec PC. Les auteurs expliquent ces résultats sur la base de l'habitude d'interaction moins élevée et donc plus difficile en VR qu'avec PC : les sujets devaient « apprendre la VR », avant d'apprendre l'application elle-même.

Nous avons présenté 1 revue systématique et 2 revues puis avons présenté les résultats de notre revue. Notre revue note les mêmes avantages que les précédentes. Nous avons présenté 18 expériences testant l'efficacité d'apprentissage avec la combinaison SG-VR. Ces études incluses en moyenne $51,11 \pm 41,19$ sujets. Les apprentissages évalués par ces articles sont : la conduite, l'entretien du matériel militaire, les langues (2 articles), la physique, l'anatomie humaine (2 articles), la sécurité (7 articles), la pratique médicale, le tir, le fonctionnement des cellules et la géométrie. On constate une prédominance des apprentissages de sécurité (souvent procédural). 13 de ces expériences consistent en des comparaisons avec un autre dispositif que la VR : 5 PC *versus* VR, 3 PowerPoint ou vidéo (PC) *versus* VR, 1 tablette *versus* VR, 2 manuels papier *versus* VR et 1 VR basse immersion *versus* haute immersion. Les 5 autres consistent en des comparaisons : apprentissage pré- *versus* post-, niveaux assistances, niveaux interactions, 2 non-experts *versus* experts. 10 expériences relèvent une meilleure efficacité d'apprentissage en VR qu'avec d'autres médias ou dispositifs, 1 indique une équivalence et 1 une supériorité du PC. La qualité d'expérience est plus élevée avec un HMD avec de hautes caractéristiques (champ de vision, résolution...) que d'autres dispositifs (PC). Une haute immersion n'influence pas toujours positivement l'apprentissage. Des interactions plus naturelles, des guides et des apprentissages préalables augmentent les performances d'apprentissage. Les auteurs notent de meilleurs immersion, engagement, présence et motivation (voir section 2.1.5) en VR qu'avec d'autres modalités. Nous n'avons pas inclus les articles scientifiques décrivant les environnements virtuels mais ne testant pas leur efficacité (position papers). Ces dernières années, la formation à la sécurité semble le sujet d'apprentissage le plus présent. Cela peut s'expliquer par la capacité à reproduire des situations dangereuses en VR sans exposer aux risques (Jensen & Konradsen, 2018).

4.1.4 Efficacité d'apprentissage avec la S3D

La revue menée avec les mots clefs, les conditions d'inclusion / d'exclusion et avec ces bases de données s'est soldée par ne retenir aucun article (voir section 3.2). À date (septembre 2019), les apports scientifiques identifiés ne permettent pas d'interroger l'efficacité d'apprentissage en VR selon l'imagerie : 2D ou S3D. La littérature compare beaucoup des dispositifs binoculaires (écran PC, TV) à des HMDs ou des CAVEs (tous affichant de la stéréoscopie). Cela rend la comparaison effective pour d'autres questions de recherche mais ne permet de savoir s'il est utile d'afficher de la stéréoscopie en HMD lors de l'apprentissage ou non. Aussi, nous restituons ici des travaux adressant cette question indépendamment de l'usage des HMDs.

Afin de déterminer l'efficacité de la S3D sur l'apprentissage, la plupart des paradigmes expérimentaux consistent à demander à des sujets de réaliser des tâches d'apprentissage soit en S3D soit en 2D. Les bénéfices de la S3D comparés à la 2D semblent dépendre du type de tâches à réaliser (McIntire *et al.*, 2012), du niveau d'expertise des utilisateurs et des caractéristiques de

l'environnement virtuel proposé. McIntire *et al.* conduisent une revue des performances (pas uniquement l'apprentissage) de réalisation des tâches en S3D versus 2D en incluant 184 articles (McIntire *et al.*, 2014). Les auteurs montrent que les tâches liées à la discrimination de la profondeur : la manipulation d'objets par exemple. 60% des 184 articles rapportent une meilleure performance en S3D qu'en 2D. Yammine et Violato conduisent une méta-analyse portant sur l'apprentissage de l'anatomie avec 31 articles inclus (Yammine & Violato, 2015). Les auteurs montrent que la S3D surpasse le plus souvent la 2D pour cet apprentissage. Les travaux de vue d'ensemble ne portent que peu sur les HMDs. Compte tenu de ces conditions, il apparaît difficile d'étendre les résultats des études présentées ci-dessus à toutes les configurations d'apprentissage. Lin et Woldegiorgis montrent dans leur revue que l'efficacité d'interaction en stéréoscopie est moins bonne qu'en environnement réel (C. J. Lin & Woldegiorgis, 2015). Ils incluent les HMDs dans leur revue et pointent deux limitations associées à la stéréoscopie : mauvaise perception des distances et inconfort visuel. Price *et al.* compilent 10 ans de leurs recherches sur l'utilisation de la stéréoscopie pour apprendre les sciences (Price, Lee, Plummer, Subbarao, & Wyatt, 2015a). Les auteurs concluent que la S3D n'est pas toujours nécessaire. Leur positionnement est que la S3D ne devrait être affichée que pour des tâches d'apprentissage le requérant : à complexe et à forte implications visuo-spatiales. Les précédents apports sur l'efficacité d'apprentissage lorsque la S3D est affichée utilisent d'autres dispositifs que les HMDs. Une meilleure efficacité en S3D comparée à la 2D s'observe dans les tâches de laparoscopie simulées (entraînement) comme le relève la revue systématique de Sørensen *et al.* sur la base de 31 articles (Sørensen, Savran, Konge, & Bjerrum, 2016). Proposer de la stéréoscopie en HMD comporte des avantages et inconvénients. Comme l'indiquent Chen *et al.* dans leur revue, appliquant la théorie coût/bénéfice, sur la visualisation de data en environnements virtuels : il est difficile de statuer s'il faut afficher ou non de la stéréoscopie (M. Chen, Gaither, John, & Mccann, 2019).

Le résultat de notre revue n'a pas permis d'inclure d'articles spécifiquement sur les HMDs et l'efficacité d'apprentissage (9 articles inclus). En plus des vues d'ensemble présentées ci-avant, les 9 articles sont contradictoires sur la supériorité de la S3D sur la 2D :

Keebler propose à 71 sujets, affectés à quatre conditions différentes en 2D et S3D sur écran d'ordinateur, une tâche d'entraînement à reconnaître des véhicules militaires (Keebler, 2011). L'analyse des différents résultats (évaluation de la mémorisation, immersion, présence, flow, engagement et acceptation de la technologie) indique que les conditions S3D auraient un impact négatif sur la rétention. En effet, la S3D serait une distraction dans certains cas. Les conclusions de Keebler tendent à indiquer que la S3D est moins efficace que la 2D. Cette tendance se retrouve dans d'autres cas avec la S3D moins efficace que la 2D (Mukai, Yamagishi, & Hirayama, 2011). Comparant un groupe de 25 sujets apprenant avec une interface en 2D et 28 sujets apprenant avec une interface en S3D, Mukai *et al.* que la 2D a été mieux réceptionnée. Par ailleurs, aucune différence significative n'est identifiable sur l'efficacité d'apprentissage entre les deux conditions. Une raison possible pour de tels résultats évoqués par Mukai *et al.* serait la fatigue visuelle rapportée par les sujets en S3D. Au contraire, d'après l'étude de Kulshreshth *et al.* la S3D (TV) améliorerait les scores obtenus dans des jeux vidéo et ainsi offrirait une meilleure courbe d'apprentissage pour réussir les tâches d'un jeu vidéo (Kulshreshth, Schild, & LaViola,

2012). Loup-Escande *et al.* demandent aux 42 participants de leur expérience d'accomplir des tâches consistant à trouver puis sélectionner et enfin déposer des pièces à l'emplacement correct (Loup-Escande, Jamet, Ragot, Erhel, & Michinov, 2017). Il s'agit d'apprendre le fonctionnement d'une chaîne énergétique d'un kart. La médiation se présente sur un écran de PC. Les résultats obtenus indiquent que lors de l'accomplissement des tâches, la S3D conduit à une meilleure efficacité pour la recherche visuelle des pièces. Cependant, l'évaluation de l'apprentissage après l'exposition à la médiation n'indique aucune différence significative entre S3D et 2D. L'avantage de cette expérience est de coupler l'expérience subjective (immersion et flow) des sujets et l'efficacité d'apprentissage. L'expérience subjective d'immersion et de flow est meilleure dans la condition S3D. Dans le cas de l'apprentissage de techniques chirurgicales, la S3D pour les apprenants novices ajouterait une charge cognitive conduisant la condition 2D à moins d'efficacité (Mistry, Roach, & Wilson, 2013). Mais dans le cas de tâches qui pourraient être considérées comme connexes à celles de l'étude de Mistry *et al.*, l'apprentissage se révélerait souvent meilleur en S3D qu'en 2D (Ashraf, Whelan, Balfe, & O'Sullivan, 2013 ; Fergo, Burcharth, Pommergaard, Kildebro, & Rosenberg, 2017 ; Storz, Buess, Kunert, & Kirschniak, 2011 ; Votanopoulos, Brunnicardi, Thornby, & Bellows, 2007 ; Wilhelm *et al.*, 2014). On constate donc que les résultats sont variés même avec d'autres dispositifs que les HMDs.

Nous avons présenté 1 méta-analyse, 1 revue systématique et 4 revues puis 9 articles initialement sur l'efficacité d'apprentissage en S3D. Cependant, une bonne part de ces articles est en dehors de nos mots clefs et critères d'inclusion/exclusion car aucun article n'a pu être inclus sur les HMDs et l'apprentissage. Les informations manquent sur l'efficacité de la stéréoscopie sur l'apprentissage de tâches non dépendantes d'interactions visuo-spatiales en VR. Il apparaît que la S3D est avantageuse pour l'apprentissage de techniques chirurgicales et l'anatomie (indépendamment de l'usage de HMDs). Ce sont des apprentissages dans lesquels la spatialisation est déterminante. Aussi, il apparaît logique que la stéréoscopie conduise à une meilleure efficacité que le bi-oculaire. Pour autant, les preuves sont maigres afin d'étendre ces résultats à toutes les configurations d'apprentissage et à tous les dispositifs. Nous avons tenté de réaliser une revue de l'efficacité d'apprentissage en HMD selon l'imagerie. Cette revue n'a conduit à l'inclusion d'aucune étude pertinente afin de répondre à cette question. Dans leur revue, Lin et Woldegiorgis appellent à plus de travaux pour déterminer l'efficacité des tâches lors de l'affichage de stéréoscopie (C. J. Lin & Woldegiorgis, 2015). Il apparaît effectivement que plus de travaux sont nécessaires afin d'accumuler les preuves pour statuer.

4.1.5 Conclusions de la revue de la littérature

Notre revue de la littérature sur l'efficacité ou inefficacité d'apprentissage via SG, VR, SG-VR et S3D présente en cumuler : 8 méta-analyses, 7 revues systématiques, 15 revues, 1 rapport scientifique et 53 articles expérimentaux. Le niveau de preuve le plus élevé se trouve dans les serious games, suivi de la VR puis les SG-VR. L'efficacité de l'affichage stéréoscopique en HMD pour l'apprentissage n'a pas pu être présenté en accord avec nos critères d'inclusion/exclusion. Cependant, les résultats montrent une supériorité de la S3D sur la 2D particulièrement pour des tâches dépendantes des coordinations yeux-mains (typiquement apprentissage de techniques de chirurgie). La synthèse globale des résultats de notre revue indique la supériorité d'efficacité d'apprentissage des SG, de la VR, de la combinaison SG-VR et la S3D sur d'autres

modalités ou la 2D. Pour la combinaison SG-VR et la VR, les apprentissages procéduraux ou des sciences sont les plus testés en conditions expérimentales.

Notre revue des preuves d'apprentissage avec SG, avec VR, la SG-VR et la S3D, indique que la communication du savoir selon ces modalités est efficace. Il transparaît de notre revue que plus les dispositifs sociotechniques proposent des stimuli (donc communiquent aux sens et perceptions de l'humain apprenant) au plus proche des conditions de l'environnement réel : plus l'apprentissage est positivement impacté. Autrement dit, reprenant les termes de Nannipieri *et al.*, plus l'environnement artificiel est « *transparent* » plus l'apprentissage semble efficace (Nannipieri *et al.*, 2014). Cependant, les preuves d'efficacité d'apprentissage pour la combinaison SG-VR et particulièrement de la S3D sont à étendre. Les apprentissages comportementaux (normes sociales sur les mots, attitudes... à adopter en sociétés selon les codes en vigueur) sont rares. Par ailleurs, l'évaluation de l'apprentissage des précédentes études ne portent pas tout le temps sur les performances, la rétention ou le transfert (voir section 2.1.4.2) mais plutôt sur la qualité d'expérience (voir section 2.1.5). La fatigue visuelle est rarement traitée voire totalement absente dans la littérature sur l'apprentissage en VR ou avec la combinaison SG-VR. C'est un risque qui n'est pas ou très peu évalué lors des expériences sur l'apprentissage avec HMDs. Ces limites que nous identifions dans les précédents travaux nous motivent à procéder à des travaux expérimentaux dont les résultats sont restitués par la suite.

4.2 EXPERIENCE 1 : FATIGUE VISUELLE ET APPRENTISSAGE SELON LE DISPOSITIF ET L'IMAGERIE

Comme nous l'avons identifié dans l'état de l'art (section 2.5) et par notre revue de la littérature (section 4.1), l'utilisation des serious games en réalité virtuelle via HMD affichant de la stéréoscopie soulève plusieurs problèmes qui peuvent modérer son intérêt lors d'un apprentissage :

- 1) les preuves d'efficacité d'apprentissage sont à étendre à des cas autres que procéduraux et avec une forte nécessité d'interactions spatialisées (voir section 4.1.3),
- 2) une fatigue visuelle peut en résulter (voir section 2.3.3.2),
- 3) l'attention pourrait être moins concentrée sur les contenus pédagogiques de par la présence de S3D car la fatigue visuelle pourrait influencer une fatigue cognitive abaissant donc les facultés d'attention particulièrement dans un contexte de forte charge cognitive comme un SG-VR (voir section 2.3.3.3),
- 4) les enjeux de sécurité et de santé publique requièrent des données scientifiques sur le dispositif d'affichage stéréoscopique qu'est le HMD en usage écologique (Anses, 2014).

Nous avons conçu notre première expérience afin d'adresser ces questions. Cette expérience propose de comparer les dispositifs : PC *versus* HMD, et les imageries : binoculaire (2D) *versus* binoculaire (S3D) *versus* binoculaire excessif (S3De). Nous y traitons les apports nécessaires identifiés (voir section 2.5) : [A1], [A2] et [A3]. Cette expérience 1 a fait l'objet de 4 communications scientifiques : (Souchet, Philippe, Ober, Lévêque, & Leroy, 2018b ; 2019c ; 2020b ; Souchet, Philippe, Zobel, Ober, Lévêque, & Leroy, 2018c).

4.2.1 Conditions expérimentales Exp1

4.2.1.1 Groupes

Quatre conditions expérimentales sont testées (voir Figure 55) :

Condition A : HMD bi-oculaire. Les images bioculaires sont deux images sans parallaxe entre les deux.

Condition B : HMD binoculaire. Les images binoculaires sont deux images avec parallaxe entre les deux (stéréoscopie). La disparité est fixée de manière moyenne en fonction de la distance inter-pupillaire selon les recommandations d'Oculus.

Condition C : PC (groupe contrôle). Le sujet se tient à une distance de 1 m de l'écran comme de précédentes études. Il est assis sur une chaise. Le serious game est lancée par l'investigateur secondaire. L'interaction se fait grâce à une souris d'ordinateur. Les images proposées sont monoculaires.

Condition D : HMD binoculaires excessives. La disparité est fixée selon nos calculs dont le détail est présenté en section 4.1.2.2.1. Nous exploitons les disparités horizontales afin de rendre difficile mais pas impossible la fusion des deux images par le système visuel. Il est attendu que les fonctions oculomotrices soient perturbées afin de disposer d'une condition limite, correspondant à des réglages de la stéréoscopie allant à l'encontre du confort des utilisateurs.

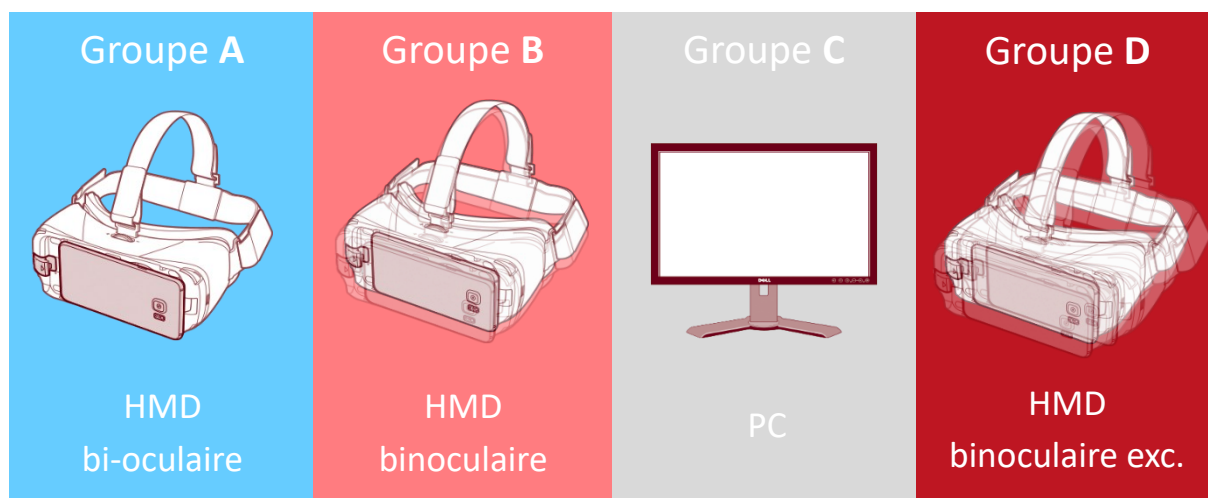


Figure 55 : Résumé des conditions expérimentales Exp1

4.2.1.2 Matériel d'exposition

Groupes A, B, D : un HMD Samsung Gear VR est utilisé avec un smartphone Samsung S6 (voir section 3.7).

Groupe C : Un PC et écran Dell avec souris sont utilisés pour la condition contrôle. Système d'exploitation : Windows 10 Family version 1709 ; Processeur : i7-4790, Fréquence processeur : 3,60 Ghz ; Mémoire vive (RAM) : 8 Go ; Modèle écran : Dell™ 2407WFP-HC Flat Panel Monitor ; Type écran : Active matrix-TFT LCD ; Dimension écran : 24 pouces ; Résolution de l'écran : 1920 x 1200 pixels à 60 Hz ; Luminance écran : 400 cd/m².

4.2.1.3 Calcul de disparité pour condition D

Pour mettre en place les conditions expérimentales du groupe D : imagerie binoculaire excessive, nous il a été nécessaire d'estimer la distance inter-caméra à mettre en place afin de favoriser la fatigue visuelle. Sur la base des études empiriques précédentes (voir section 2.3.3.2.2), nous avons déterminé que la distance entre les caméras à implémenter dans le logiciel Unity afin de générer une condition fatigante d'après une **disparité rétinienne excessive est de 73,59 mm**. Le détail des calculs permettant d'arriver à ce résultat est présenté ci-après.

4.2.1.3.1 Définition des variables

La valeur de disparité rétinienne à laquelle une fatigue ou un inconfort visuel sont détectés a été documenté (voir section 2.3.3.2.2). Cependant, une telle valeur est dépendante du matériel et les caractéristiques de l'environnement virtuel. Dans notre cas, il s'agit de mesurer les distances entre les différents composants du Samsung Gear VR. Le moteur Unity 3D utilise le système métrique. Ainsi, plusieurs variables sont à considérer et à calculer sur la base d'équations. La Figure 56 introduit ces variables et les met en rapport en un schéma impliquant les yeux humains, les caméras Unity, l'écran projeté par les lentilles et la distance à laquelle se trouve l'objet virtuel par rapport à cet écran.

Concernant les propriétés des lentilles et la variabilité des propriétés optiques du casque, des mesures ont été réalisées par nos soins, Samsung n'ayant pas répondu à nos sollicitations auprès de leur bureau d'étude. D correspond à distance : $D(\text{Foyer-Lentille}) = 45,6 \text{ mm}$; $D(\text{Lentille-écran}) = \text{entre } 40,2 \text{ mm plus grand écart et } 31 \text{ mm plus petit écart}$ (la molette permettant un réglage par les sujets éloigne l'écran des lentilles afin de régler la « netteté ») ; $D(\text{Lentille-yeux}) = 24,5 \text{ mm}$; Plan d'accommodation = $255,75 \text{ mm}$.

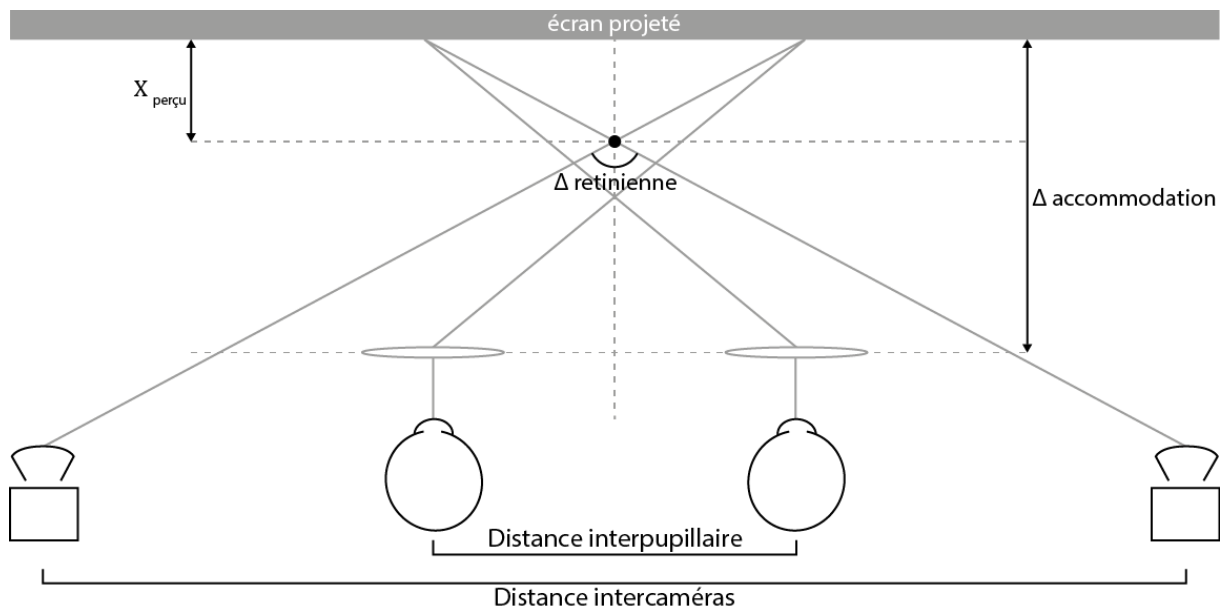


Figure 56 : Définition de la distance inter-caméras d'après le Δ max de disparité rétinienne confortable en stéréoscopie

DIC = Distance Intercaméras : correspond à l'écart entre les deux caméras virtuelles présentes dans Unity 3D et permettant de créer la disparité pour la vision stéréoscopique des images. Elle est gérée à travers le SDK d'Oculus implémenté dans Unity 3D et gérant le Samsung Gear VR 2.

DIO = Distance Interoculaire moyenne chez l'adulte en France : 65 mm d'après le rapport de l'Anses (Anses, 2014).

$x_{perçu}$ = endroit où l'objet virtuel est perçu (devant ou derrière l'écran). Dans notre cas, l'objet virtuel correspond aux textes et leurs cadres à sélectionner par le sujet afin de sélectionner le dialogue souhaité dans Mon entretien d'embauche.

accommodation = plan d'accommodation, soit 339 mm soit 96,8 mm car la molette du HMD permet de faire varier ces valeurs : est obtenu par mesure des expérimentateurs et correspond à la distance entre l'écran du téléphone et les lentilles du HMD Samsung Gear VR 2.

Δretinniennne = 1,6° : disparité maximum déduit à partir de Fuchs déclarant un stress visuel dès 1.5° pour des objets virtuels très « proches » de l'utilisateur (Fuchs, 2016). Cette disparité rétinienne est retenue car la plus élevée de toutes celles annoncées comme fatigantes (voir section 2.3.3.2.2)

ΔCameraObjet = distance (profondeur) entre les objets virtuels et les caméras dans Unity 3D.

4.2.1.3.2 Calcul de la Distance Inter-Caméras

Nous sélectionnons les objets textes et cadre de dialogue de la scène Unity correspondant aux réponses disponibles par l'utilisateur afin de les placer devant l'écran projeté. Les sujets percevront les textes et les rectangles comme « sortant de l'écran » avec des disparités négatives.

$$DIC = \frac{P}{accommodation - \Delta CameraObjet} \times \Delta CameraObjet$$

Cette équation nous permet d'obtenir une valeur en millimètres de la distance à implémenter entre les deux caméras dans le logiciel Unity 3D (converti en pixels à l'export). Elle nous assure une valeur moyenne de disparité élevée. Notons également que ces valeurs prennent en compte des propriétés physiques des lentilles en conditions idéales.

Calcul de la disparité horizontale maximum notée α_{max} en degrés (°)

Soit :

Une disparité horizontale de 10,95244° notée $\Delta_{horizontale}$

Une disparité rétinienne de 1,6° notée $\Delta_{retinniennne}$

Une distance inter pupillaire de 65 mm notée DIO

Une distance d'accommodation de 339 mm notée $accommodation$

$$\Delta_{horizontale} = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\frac{DIO}{2}}{accommodation} \right)$$

$$\Delta_{horizontale} = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{65}{339} \right)$$

$$\Delta_{horizontale} = 10,95244$$

Et donc :

$$\alpha_{max} = \Delta_{horizontale} + \Delta_{retinnienne}$$

$$\alpha_{max} = 10,95244 + 1.6$$

$$\alpha_{max} = 12,5524^\circ$$

Calcul de la distance auquel l'objet virtuel devrait être perçu noté $x_{perçu}$ en millimètres

$$x_{perçu} = \frac{DIO}{2 \times \tan \frac{\alpha_{max}}{2}}$$

$$x_{perçu} = \frac{65}{2 \times \tan \frac{12,5524}{2}}$$

$$x_{perçu} = 295,50 \text{ mm}$$

Calcul de la Parallaxe notée P en millimètres

$$P = \frac{DIO \times (\Delta_{accommodation} - x_{perçu})}{x_{perçu}}$$

$$P = \frac{65 \times (339 - 295,50)}{295,50}$$

$$P = \frac{65 \times 43,494}{295,50}$$

$$P = 9,567 \text{ mm}$$

Calcul Distance InterCameras pour disparités négatives notée DIC

Soit :

Une distance entre les caméras Unity et l'objet notée $\Delta_{CameraObjet}$ en millimètres

$$DIC = \frac{P}{\Delta_{accommodation} - \Delta_{CameraObjet}} \times \Delta_{CameraObjet}$$

$$DIC = \frac{9,567}{339 - 300} \times 300$$

$$DIC = 73,59 \text{ mm}$$

4.2.1.4 Application de la disparité sur Mon entretien d'Embauche

La parallaxe a été appliquée sur les boîtes de dialogue et le texte ainsi que l'objet lampe posé sur le bureau (voir Figure 57).



Figure 57 : Carte d'application de la disparité rétinienne calculée. En rouge, les boîtes de dialogues sont les images les plus proches du système visuel en parallaxe négative. En orange, la lampe est moins proche du système visuel en parallaxe négative. Ces objets « sortes de l'écran. »

4.2.1.5 Procédure et Mesures

Le sujet complète un questionnaire de profil : voir Annexe 5. Les mesures optométriques sont effectuées avant (pre-) et après (post-) l'exposition. Les mesures de performance sont obtenues pendant l'exposition. Les questionnaires (inconfort visuel, présence, flow) sont complétés après les tests optométriques. La mesure de l'état sensori-moteur est opérée en dernier (Tinetti-POMA test). Toutes ces mesures sont opérées le même jour. Les sujets disposent d'une heure, tests après exposition inclus, pour reposer le système visuel et regagner leur pleine capacité sensori-motrice en cas de perturbation sur le lieu de l'expérimentation avant de partir. Une exposition de 30 minutes au total est proposée aux sujets car il s'agit d'un temps de référence dans la littérature (Kozulin *et al.*, 2009). Les sujets sont assis sur une chaise pour chaque condition. Le déroulé complet est schématisé en Figure 58. Les sujets rejouent à Mon entretien d'embauche sur leur PC personnel 1 mois après l'exposition (E3).

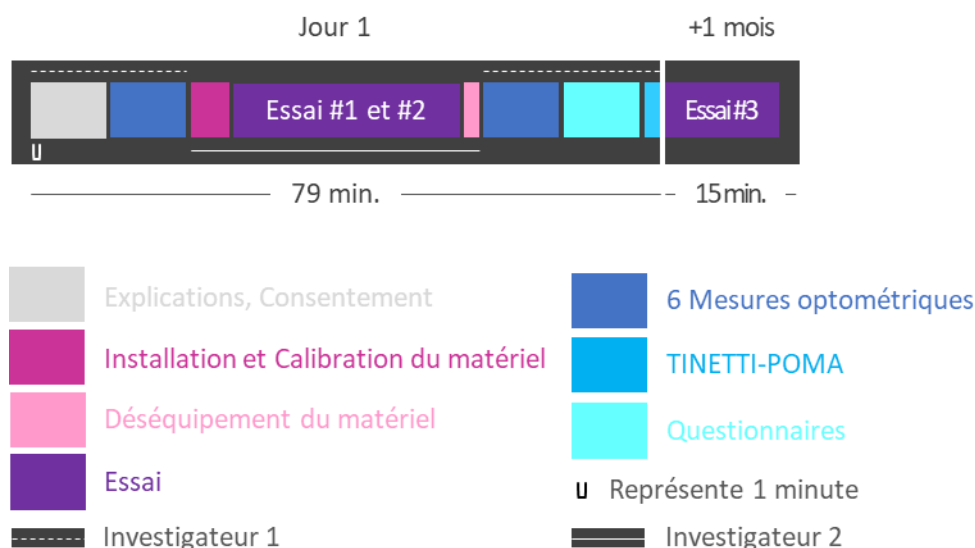


Figure 58 : Schéma déroulé de l'Expérience 1

L'expérimentation se déroule dans les locaux du Centre de Veille et d'Innovation de IDEFI-CréaTIC : Tour Montparnasse 5ème étage 33 Avenue du Maine 75015 Paris.

4.2.1.5.1 Mesures

Les 6 mesures présentées en Section 3.3.1 sont opérées pre- et post- exposition. L'Acuité stéréoscopique est mesurée avec le TNO. La capacité de vergence est mesurée grâce au Schober test. Le Point de fusion (disparité positive, négative) et Rupture de fusion (disparité positive, négative) : sont mesurés via haploscope « virtuel ». La rapidité d'accommodation est mesurée via le Flipper Lens Test (+2,00/-2,00). Le Punctum Proximum d'Accommodation est mesuré via le Donder's Push-Up Test. L'Acuité visuelle est mesurée via le E de Raskin.

En jeu : le score, le nombre de bonne/mauvaise/moyenne réponses et le temps de réponse sont enregistrées. Ces mesures sont opérées pour les 3 essais (E1 et E2 le même jour puis E3 1 mois plus tard). Nous considérons qu'un apprentissage (performance) correspond à un meilleur score (mémoire court terme des bonnes ou mauvaises réponses obtenues lors de E1) et/ou un temps moins long de réponse lors de E2 comparé à E1. La même logique est suivie pour l'apprentissage long terme (rétention) en comparant E2 à E3. Le delta entre chaque essai correspond à la courbe d'apprentissage.

La présence est évaluée à travers le questionnaire « Multimodal Presence Scale » (Makransky *et al.*, 2017). Le flow est évalué à travers le questionnaire « Flow Short Scale » (Engeser & Rheinberg, 2008). L'Inconfort Visuel est évalué via le questionnaire de Zeri et Livi (Zeri & Livi, 2015).

4.2.1.5.2 Design, Randomisation et Double aveugle

L'expérience suit un **design mixte intra-sujet et inter-sujet, randomisé et en double aveugle**. D'une part, l'investigateur principal connaît la correspondance entre les conditions A, B, C, D. C'est lui qui prépare les équipements VR, installe les applications et marque les dispositifs comme défini. Il ne sait pas dans quel groupe sont placés les volontaires. Il procède au recueil du consentement, aux mesures optométriques, à la soumission des questionnaires de qualité

d'expérience et au test d'équilibre. D'autre part l'investigateur secondaire réalise la Randomisation. Il tire un dé 20 faces pour assigner chaque sujet à une condition : 1 à 5 = condition A, 6 à 10 = condition B, 11 à 15 = condition C, 16 à 20 = condition D. L'investigateur secondaire sait dans quel groupe sont placés les volontaires mais ne sait pas à quelle condition correspond chaque groupe ni ne connaît les hypothèses testées. Enfin les sujets ne connaissent par leur assignation afin de prévenir tout effet Placebo ou Nocebo. L'investigateur secondaire est un stagiaire : Dimitri Zobel. Étudiant en Licence de Biologie-Santé à l'UPEC (Paris 12).

4.2.1.6 Participants

93 sujets ont pris part à cette expérience. L'échantillon est composé de 57 femmes et de 36 hommes âgés de 18 à 39 ans, $M = 25,20 \pm 0,53$ ($SD = 5,17$) ans. Ces sujets remplissent les critères d'inclusion établis en section 3.8. Les sujets sont essentiellement des étudiants (psychologie, digital, ressources humaines, ergonomie, commerce, droit, marketing et arts) ainsi que des chercheurs (psychologie majoritairement).

Un questionnaire de profil a été soumis aux sujets avant leur participation à l'expérience afin de connaître leur expérience des dispositifs auxquels ils seraient exposés : voir Figure 59, et le rapport à l'entretien d'embauche : voir Figure 60. Voir Annexe 5.

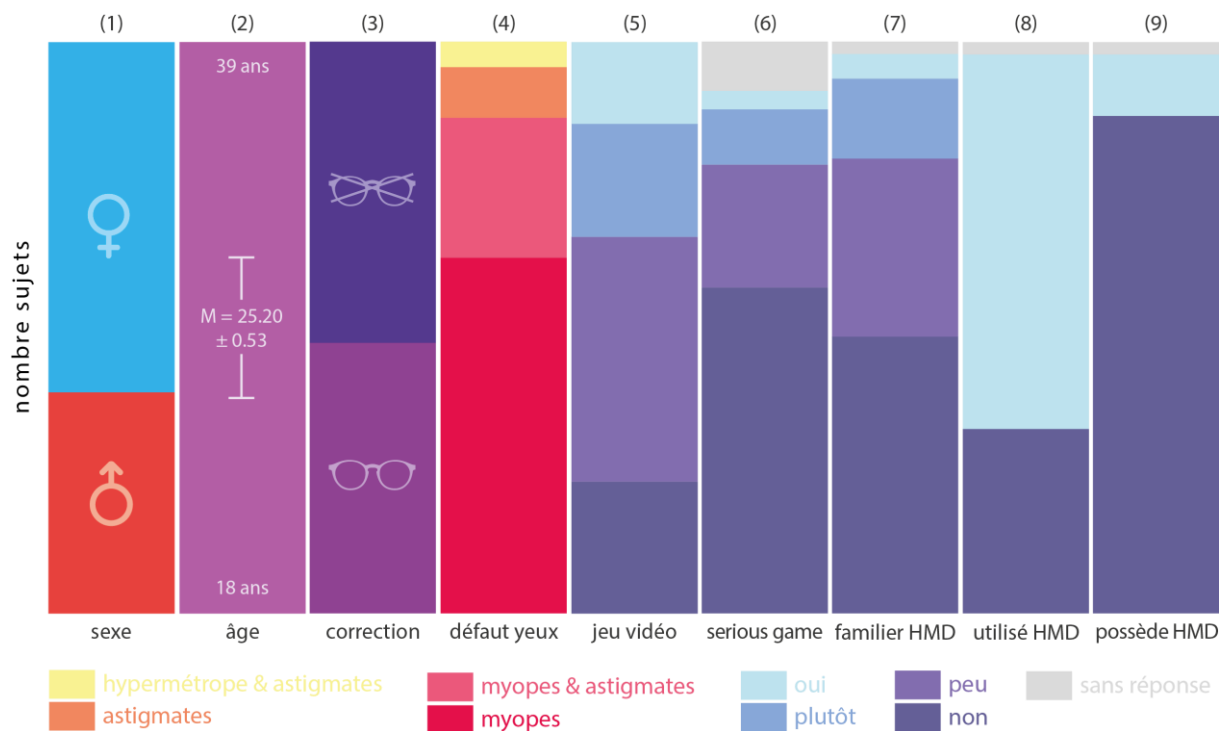


Figure 59 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil Exp1. (1) 57 femmes et 36 hommes. (2) âgés de 18 à 39 ans, $M = 25,20 \pm 0,53$ ($SD = 5,17$) ans. (3) 49 sujets ne portent aucune correction et 44 portent soit des lunettes soit des lentilles. (4) 28 présentent une myopie, 11 une myopie et une astigmatie combinés, 4 une astigmatie et enfin 2 une hypermétropie et astigmatie combinés. (5) « Avez-vous ou avez-vous eu une pratique soutenue des jeux vidéo ? » : non = 21, peu = 39, plutôt = 13, oui = 18. (6) « Estimez-vous être familier des serious games ? » : non = 53, peu = 20, plutôt = 9, oui = 3, n'ont pas répondu = 8. (7) « Estimez-vous être familier des casques de réalité virtuelle ? (CardBoard, Oculus Rift, HTC Vive Playstation VR, Samsung Gear VR...) » : non = 45, peu = 29, plutôt = 13, oui = 4, n'ont pas répondu = 2. (8) « Possédez-vous un casque de réalité virtuelle ? » : non = 81, oui = 10, n'ont pas répondu = 2. (9) « Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle ? » : non = 30, oui = 61, n'ont pas répondu = 2.

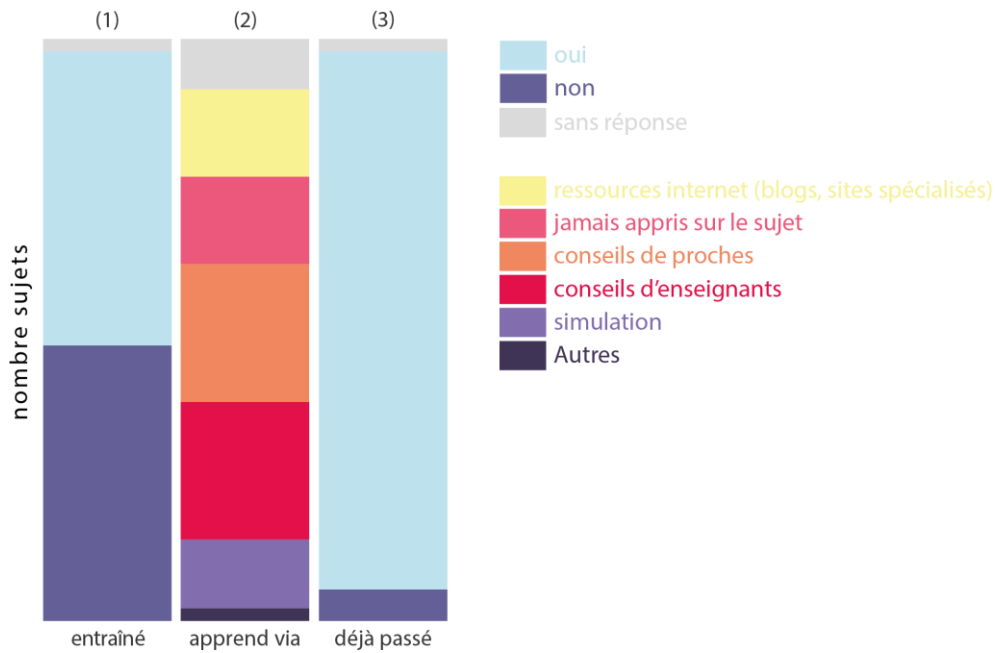


Figure 60 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil entretien d'embauche Exp1. (1) « Vous êtes-vous déjà entraîné à passer un entretien d'embauche ? » : non = 44, oui = 47, n'ont pas répondu = 2. (2) « Lorsque vous devez trouver un emploi / un stage, quelle approche privilégiez-vous pour apprendre les meilleures pratiques à adopter lors d'un entretien d'embauche ? » : Conseils de vos enseignants = 14, Conseils de vos proches = 22, Je n'ai jamais appris sur ce sujet = 14, Ressources internet (blogs, sites spécialisés) = 22, Simulation = 11, Autres = 2, n'ont pas répondu = 8. (3) « Avez-vous déjà passé un entretien d'embauche ? » : non = 5, oui = 86, n'ont pas répondu = 2.

4.2.1.7 Aspects éthiques et rémunération

Ce protocole de recherche a fait l'objet d'un avis favorable du CER Paris Descartes (voir section 3.9). 20 € de compensation pour chaque sujet sous forme de chèque cadeau Amazon est distribuée après l'envoi des résultats du dernier essai 1 mois (E3) après le premier passage.

4.2.1.8 Analyses et Statistiques

69 jeux de données sont utilisés dans les statistiques car les participants du groupe D n'ont pas été considérés dans l'analyse des données.

Les tests statistiques sont opérés d'une part dans chaque condition (comparaison mesures pre- et post-exposition puis comparaison E1/E2 et E2/E3) et d'autre part entre les groupes (courbes d'apprentissage, deltaE1/E2/E3 puis comparaison QoE). **Le niveau de significativité est testé avec un $\alpha = 0,05$.** Le logiciel Jamovi version 0.9.1.9 (2018) a été utilisé pour réaliser les tests statistiques. Le logiciel R version 3.5.0 (2018-04-23) a été utilisé pour réaliser les graphiques.

4.2.1.9 Hypothèses de travail

Nous posons 4 hypothèses de travail :

- H_{exp1} : Les courbes d'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game sont moins efficaces lorsque les apprenants présentent une fatigue visuelle.
- H_{exp2} : la fatigue visuelle détériore la qualité d'expérience lors de l'apprentissage en serious game.

- H_{exp13} : l'imagerie binoculaire (S3D) conduit à plus de fatigue visuelle que l'imagerie bi-oculaire (2D).
- H_{exp14} : les courbes d'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game ont une progression plus élevée avec un HMD qu'avec un PC.

4.2.2 Données collectées et analyses statistiques Exp1

La répartition aléatoire des sujets dans chaque groupe a abouti à un nombre très proche d'individus pour chaque condition (voir Tableau 12).

Tableau 12 : Expérience 1, résultat de la répartition aléatoire des sujets par condition

Condition	Nombre de sujets
A	24
B	23
C	23
D	22

L'incapacité à créer la condition expérimentale souhaitée et le manque de contrôle sur la condition D nous encourage à exclure ce groupe des résultats. En effet, les conditions de réalisation de la S3D excessive ont été mal évaluées par rapport à notre environnement virtuel. Cela est dû à un mauvais réglage des disparités lors de la création de cette condition dans Unity 3D : trop peu d'objets dans la scène étaient en relief ou en profondeur. De plus, la valeur de disparité rétinienne ($1,6^\circ$) retenue n'apparaît pas assez stressante visuellement avec notre serious game. Des pré-tests pour valider un stress plus important en condition D comparé à B aurait été plus approprié. **La condition D est donc considérée comme inexploitable et n'est pas traitée dans les résultats.** Compte tenu de ce manque de contrôle sur la condition, il est également envisageable de fusionner le groupe D avec le groupe B. Nous traitons ce choix dans la section 5.1.

69 sujets sont considérés pour traiter les hypothèses de cette expérience (conditions A, B et C). L'échantillon retenu comporte 41 femmes et 28 hommes âgés de $M = 25,01 \pm 0,21$ ($SD = 5,30$) ans. 37 sujets ne portent pas de corrections et 32 portent des lunettes ou des lentilles. De ceux portant des corrections, 21 sont myopes, 2 sont astigmatas, 7 sont myopes et astigmatas, enfin 2 sont hypermétropes et astigmatas.

Un abandon d'un certain nombre de sujets sur la seconde partie de l'expérience (1 mois plus tard) est constaté. Nous décrivons la population restante en section 4.1.3.2.2.

Nous ne présentons qu'une partie des mesures opérées pour plus de lisibilité. Un résumé des tests sur chaque mesure est disponible en Annexe 6.

4.2.2.1 Fatigue visuelle

4.2.2.1.1 Acuité stéréoscopique (AS)

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Aucune mesure pour les données récoltées pre-exposition ne suit une distribution normale. Les données récoltées post-exposition pour les groupes A et B suivent une distribution normale, respectivement $p = 0,079$ et $p = 0,139$, mais pas pour le groupe C. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non**

paramétriques afin de tester la différence d'acuité stéréoscopique entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.

Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucun ne suivait une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence le Δ AS entre les groupes.**

4.2.2.1.1.1 Différence pre- et post-exposition dans chaque groupe

Nous voulons évaluer ici, groupe par groupe, l'influence de l'exposition sur l'acuité stéréoscopique.

Les données sont appariées. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour chaque groupe. Moins le score est élevé, moins l'acuité stéréoscopique est bonne. L'hypothèse testée est que l'acuité pre- sera différente de celle post-exposition. Voir Figure 61.

Groupe A : HMD-2D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs avant exposition n'était pas statistiquement plus grande que la médiane des rangs après exposition $Z = -2,192$, $p =$ impossible à calculer car l'échantillon est trop petit.

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test bilatéral a indiqué que la médiane des rangs, $Md = -6,11$, pre-exposition était statistiquement différente de la médiane des rangs post- exposition $W = 4$, **$p = 0,024$.**

L'acuité stéréoscopique du groupe A n'a que légèrement chutée de $-8,03\%$ en moyenne entre pre- et post-exposition. 8 sujets sur 24 montrent une chute, un sujet montre un score plus élevé tandis que la majorité 15 n'a pas modifié son score.

Groupe B : HMD-S3D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs avant exposition n'était pas statistiquement plus grande que la médiane des rangs après exposition $Z = -1,572$, $p =$ impossible à calculer car l'échantillon est trop petit. Un Wilcoxon Signed-Ranks Test bilatéral a indiqué que la médiane des rangs, $Md = 3,83$, pre-exposition n'était pas différente de la médiane des rangs post-exposition $W = 3$, $p = 0,120$. L'acuité stéréoscopique du groupe B n'a que légèrement chutée de $-4,50\%$ en moyenne entre pre- et post-exposition. 5 sujets sur 22 ($22,8\%$) montrent une chute, un sujet montre un score plus élevé ($4,5\%$) tandis que la majorité 16 ($72,7\%$) n'a pas modifié leur score.

Groupe C : PC

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test bilatéral a indiqué que la médiane des rangs, $Md = -1,86$, pre-exposition n'était pas statistiquement plus grande que la médiane des rangs post-exposition $W = 12$, $p = 0,792$. L'acuité stéréoscopique du groupe C augmente légèrement de $+1,6\%$ entre avant et après exposition. 4 sujets sur 23 ($17,4\%$) montrent une chute, 2 montrent un score plus élevé ($8,7\%$) tandis que la majorité 17 ($73,9\%$) n'a pas modifié leur score.

4.2.2.1.1.2 Différence entre groupes (Δ AS)

Les mesures pre- et post-exposition sont soustraites pour obtenir un Δ AS. Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis Test est utilisé afin de tester la différence de Δ AS entre les groupes. L'hypothèse testée est que la différence d'acuité entre pre- et post-exposition sera différente entre condition en HMD comparée à la condition devant PC puis entre les conditions avec casques eux-mêmes, soit respectivement groupe $A \neq B \neq C$ avec une tendance pour $A > B > C$. Le Kruskal-Wallis Test indique qu'il n'y a pas de différence significative ($H(2,79) = 2, p = 0,248$), avec un rang moyen de 28,417 pour le groupe A, 32,818 pour le groupe B et 37,348 pour le groupe C.

4.2.2.1.1.3 Synthèse des résultats

Des tests non paramétriques ont été opérés suivant les résultats des Shapiro-Wilk test indiquant que la plupart des variables ne suivaient pas une distribution normale. Nous avons testé la différence d'acuité stéréoscopique pre- et post-exposition pour chaque groupe avec le Wilcoxon Signed-Ranks Test. Il a indiqué une différence statistiquement significative uniquement pour le groupe A : HMD-2D. Le Kruskal-Wallis Test a indiqué qu'il n'y a pas de différence significative entre le delta d'acuité stéréoscopique pre- et post-exposition entre les groupes. La baisse d'acuité stéréoscopique est équivalente entre les groupes.

4.2.2.1.2 **Acuité Visuelle (AV)**

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Aucune mesure pour les données récoltées avant et après exposition ne suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence d'acuité visuelle entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des scores entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucun ne suivait une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester le Δ AV entre les groupes.**

4.2.2.1.2.1 Différence pre-/post-exposition dans chaque groupe

Les données sont appariées, aussi le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour chaque groupe. Moins le score est élevé, moins l'acuité visuelle est bonne. L'hypothèse testée est que l'acuité post- sera différente de celle pre-exposition.

Groupe A : HMD-2D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition était statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -2,934, p = 0,003$. On constate ainsi que l'acuité visuelle du groupe A chute de -10,83% en moyenne entre pre- et post-exposition. 11 sujets sur 24 (45,83%) montrent une chute, les 13 autres n'ont pas modifié leur score.

Groupe B : HMD-S3D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition était statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -2,223, p = 0,026$. L'acuité visuelle du groupe B chute de -8,96% en moyenne entre pre- et post-exposition. 9

sujets sur 22 (40,91%) montrent une chute, 2 ont amélioré leur score, les 11 autres n'ont pas modifié leur score.

Groupe C : PC

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test bilatéral a indiqué que la médiane des rangs, $Md = 0,31$, pre-exposition n'était pas statistiquement plus grande que la médiane des rangs post-exposition $W = 3,5$, $p = 0,129$. L'acuité stéréoscopique du groupe C augmente légèrement de +1,6% entre pre- et post-exposition. 5 sujets sur 23 (21,73%) montrent une chute, 1 montrent un score plus élevé tandis que la majorité 17 n'a pas modifié leur score.

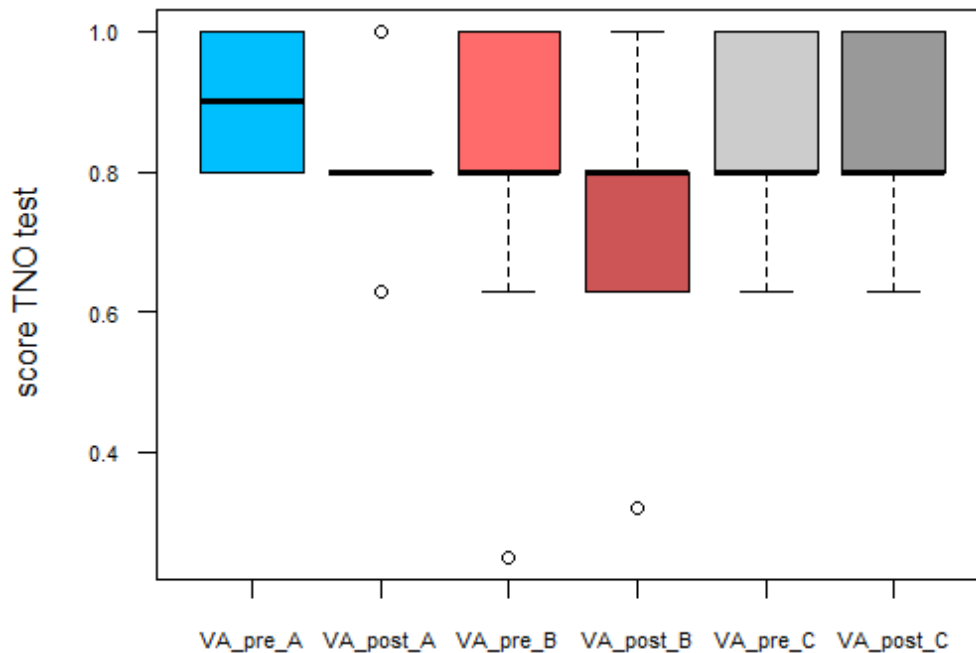


Figure 61 : Exp1, boîtes à moustache différence pre- et post-exposition d'Acuité visuelle dans chaque groupe

4.2.2.1.2.2 Différence entre groupes (ΔAV)

Les mesures pre- et post-exposition sont soustrait pour obtenir un ΔAV . Les données sont indépendantes. Nous comparons plus de trois groupes et la variabilité des scores de chaque groupe suit une distribution similaire (non-normale). Le Kruskal-Wallis Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition entre les groupes. Moins le score est élevé, moins l'acuité visuelle est bonne. L'hypothèse testée est que ΔAV sera différente entre chaque groupe, soit respectivement groupe $A \neq B \neq C$ avec une tendance groupe $C > A > B$.

Le Kruskal-Wallis Test indique qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative de ΔAV entre les groupes ($H(4,875 = 3, p = 0,181)$) avec un rang moyen de 25,917 pour le groupe A, 28,227 pour le groupe B et 34 pour le groupe C. Un Dunn's Post-Hoc tests sans correction est tout de même appliqué pour comparer les groupes entre eux par pair. Il y a une différence statistiquement significative entre les groupes A et C ($MD = -0,55$, $SE = 0,25$) $Z = -1,860$, $p = 0,031$. La différence entre groupes B et C ($MD = -0,31$, $SE = 0,25$) $Z = -0,972$, $p = 0,165$ et groupes A et B ($MD = -0,23$, $SE = 0,25$) $Z = -0,853$, $p = 0,197$ n'est pas significative.

4.2.2.1.2.3 Synthèse des résultats

Des tests non paramétriques ont été opérés suivant les résultats des Shapiro-Wilk test indiquant que la plupart des variables ne suivaient pas une distribution normale. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test a indiqué que l'acuité visuelle pre- et post-exposition est significativement différente pour les groupes A et B mais pas le C. Le Kruskal-Wallis Test a indiqué qu'il n'y a pas de différence significative de ΔAV entre les groupes. Des Post-Hocs tests ont montré qu'il y a une différence significative entre le ΔAV des groupes A et C mais pas dans les autres comparaisons. Les résultats de la différence d'acuité visuelle permettent de soutenir partiellement $H_{\text{expl 1}}$.

4.2.2.1.3 **Punctum Proximum d'Accommodation (PPA)**

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données récoltées pre- et post-exposition pour le groupe B suivent une distribution normale, respectivement $p = 0,215$ et $p = 0,667$, mais pas pour les groupes A et C. **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques pour le groupe B et non paramétriques pour les groupes A et C afin de tester la différence du point le plus proche d'accommodation entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : seul le groupe B suit une distribution normale ($p = 0,203$). **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence ΔPPA entre les groupes.**

4.2.2.1.3.1 Différence pre-/post-exposition

Les données sont appariées, aussi le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour les groupes A et C puis un T-test pour le groupe B. Plus la mesure est élevée, plus le PPA est éloigné (donc plus les yeux sont incapables d'accommoder proche). L'hypothèse testée est que le point le plus proche d'accommodation post- sera différent de celui pre-exposition.

Groupe A : HMD-2D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition, $MD = -14,50$, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -4,197$, $p = < 0,001$. Le PPA du groupe A chute entre pre- and post-exposition. Le PPA du groupe A chute de $-18,37\%$ entre pre- et post-exposition. 1 sujets sur 24 ($4,17\%$) obtient le même résultat pre- et post-exposition alors que tous les autres 23 sujets sur 24 ($95,83\%$) montrent une chute.

Groupe B : HMD-S3D

Le t-test indique une différence significative de PPA pre- ($M = 68$, $SD = 3,46$) et post-exposition ($M = 82,8$, $SD = 4,05$), $t(21) = -7,16$, $p = < 0,001$. Le PPA du groupe B chute de $-17,90\%$ entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (23) montrent une chute.

Groupe C : PC

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition, $MD = -14$, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -3,808$, $p = < 0,001$. Le PPA du groupe C chute entre pre- and post-exposition. Le PPA du groupe C chute de $-7,17\%$ entre pre- et post-exposition. 3 sujets sur 23 ($13,04\%$) obtiennent le même

résultat pre- et post-exposition alors que tous les autres 20 sujets sur 23 (86,96%) montrent une chute.

Voir Figure 62.

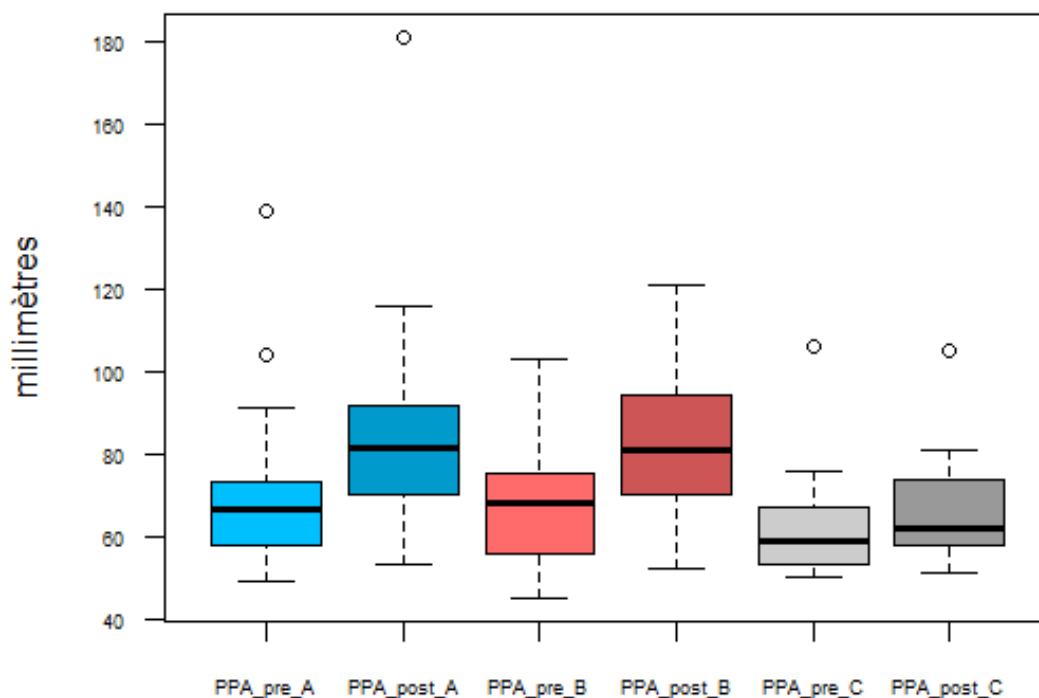


Figure 62 : Exp1, boîtes à moustache différence pre- et post-exposition de PPA dans chaque groupe

4.2.2.1.3.2 Différence entre groupes (Δ PPA)

Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis indique une différence statistiquement significative de Δ PPA entre les groupes ($H(19,82) = 2$, $p = < 0,001$), avec un rang moyen de 29,083 pour le groupe A, 25,227 pour le groupe B et 11,435 pour le groupe C. Un Dunn's Post-Hoc test sans correction a été conduit pour tester la différence par pair. La différence entre groupe A et B n'est pas significative ($MD = 0,932$, $SE = 2,880$) $Z = -0,156$, $p = 0,438$. La différence entre groupe A et C est significative ($MD = 10,967$, $SE = 2,847$) $Z = 3,818$, $p = < 0,001$. La différence entre groupe B et C est significative ($MD = 10,036$, $SE = 2,910$) $Z = 3,890$, $p = < 0,001$. Voir Figure 63.

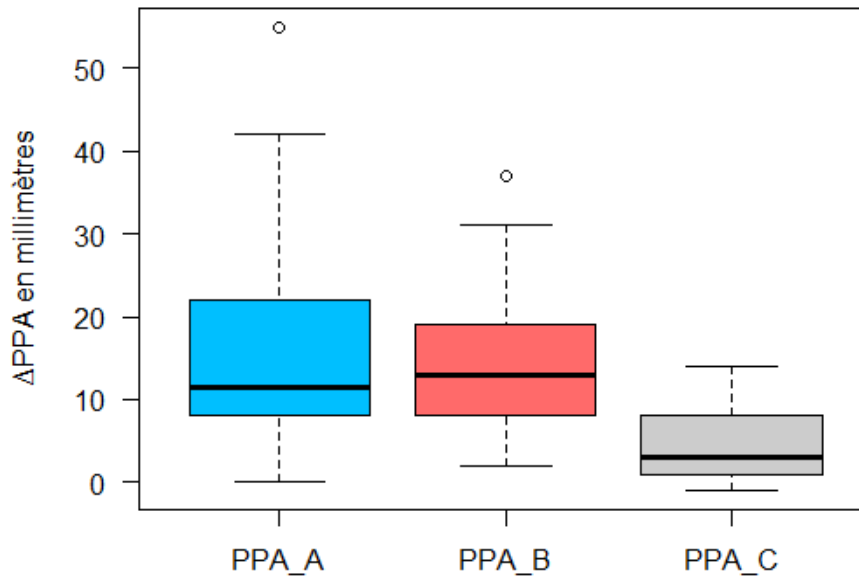


Figure 63 : Exp1, boîtes à moustache différence de Δ PPA entre les groupes

4.2.2.1.3.3 Synthèse des résultats

Des tests non paramétriques et paramétriques ont été opérés suivant les résultats des Shapiro-Wilk test indiquant que seules variables les variables du groupe B suivaient une distribution normale. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test a indiqué que le Punctum Proximum of Accommodation pre- et post-exposition est significativement différente pour les trois groupes. Le Kruskal-Wallis Test a indiqué qu'il y a une différence significative de Δ PPA entre les groupes. Des Post-Hocs tests ont montré qu'il y a une différence significative entre le Δ PPA avec HMDs (A & B) et le groupe PC (C). Les résultats de la différence de PPA permettent de soutenir $H_{\text{exp}1}$.

4.2.2.1.4 **Point de Fusion et Point de Rupture (PF-PR)**

Seul un des tests statistiques opérés indique une différence significative du Point de Fusion positive du groupe C (PC). Aussi, nous ne présentons pas le détail des résultats de cette mesure. La fiabilité de cette mesure est traitée dans la discussion générale de cette thèse en section 5.5.1.

4.2.2.1.5 **Facilité d'accommodation (FA)**

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données récoltées pre- et post-exposition pour le groupe C suivent une distribution normale, respectivement $p = 0,231$ et $p = 0,168$, mais pas pour les groupes A et B. **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques pour le groupe C et non paramétriques pour les groupes A et B afin de tester la différence de facilité d'accommodation entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucune ne suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence Δ FA entre les groupes.**

4.2.2.1.5.1 Différence pre-/post-exposition

Les données sont appariées, aussi le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour les groupes A et B puis un t-test pour le groupe C.

Moins la valeur est élevée, moins la facilité d'accommodation est élevée. L'hypothèse testée est que la facilité d'accommodation post- sera différente de celle pre-exposition.

Groupe A : HMD-2D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition, MD = 1,50, n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition W = 58,5, p = 0,084. La facilité d'accommodation du groupe A chute entre pre- and post-exposition : -3,19%.

Groupe B : HMD-S3D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition, MD = 2,50, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition Z = 2,374, p = **0,018**. La facilité d'accommodation du groupe B chute entre pre- and post-exposition : -9,59%.

Groupe C : PC

Le t-test indique qu'il n'y a pas de différence significative de FA pre- (M = 30, SD = 10,4) et post-exposition (M = 32, SD = 10,5), t (22) = -1.13, p = 0,273. La facilité d'accommodation du groupe C chute de -1,86% entre pre- et post-exposition.

4.2.2.1.5.2 Différence entre groupes (Δ FA)

Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis test indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes pour le Δ FA pre- et post-exposition (H (1,87) = 2, p = 0,392), avec un rang moyen de 10,25 pour le groupe A, 14,773 pour le groupe B. et 7,130 pour le groupe C.

4.2.2.1.5.3 Synthèse des résultats

La tendance médiane indique que la condition B était la plus fatigante, suivie de la condition A et enfin de la condition C. Cependant, les résultats ne sont pas statistiquement significatifs pour le groupe B (HMD-S3D) et aucun résultat statistiquement significatif ne corrobore cette tendance observée lorsque la différence entre les groupes (Δ FA) est testée.

4.2.2.1.6 **Amplitude de Vergence (AV)**

Aucun des tests statistiques opérés indique une différence significative dans l'amplitude de vergence. Aussi, nous ne présentons pas le détail des résultats de cette mesure. La fiabilité de cette mesure est traitée dans la discussion générale de cette thèse en section 5.5.1.

4.2.2.1.7 **Synthèse des résultats pour la fatigue visuelle**

Nous avons mesuré la fatigue visuelle induite par les dispositifs (PC ou HMD) et l'imagerie (bi-oculaire ou binoculaire) via 6 tests optométriques. Les résultats des tests statistiques effectués sur les mesures indiquent que l'imagerie binoculaire (S3D) entraîne une plus grande fatigue visuelle que l'imagerie bioculaire (2D). Cela se base sur le punctum proximum d'accommodation, l'acuité stéréoscopique, la facilité d'accommodation mais pas l'acuité visuelle. Enfin, la fatigue visuelle est globalement plus élevée en HMD que devant PC. H_{exp}3 : l'imagerie binoculaire (S3D) conduit à plus de fatigue visuelle que l'imagerie bi-oculaire (2D) est soutenue.

4.2.2.2 Apprentissage

Deux métriques sont utilisées : scores en jeu (S) et temps de réponse (TdR).

4.2.2.2.1 Performance

4.2.2.2.1.1 Scores performance

Les données correspondent au score en jeu allant de 0 à 63 000.

4.2.2.2.1.1.1 Différence Scores E1-E2 dans chaque groupe

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Toutes les données du premier essai (S-E1) suivent une distribution normale (S-E1 : A, $p = 0,323$; B, $p = 0,083$; C, $p = 0,099$). Pour le second essai (S-E2) seules les données du groupe A ($p = 0,074$) suivent une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques afin de tester la différence entre S-E1 et S-E2 dans chaque groupe.** Plus le score dans le jeu est élevé, plus l'apprentissage (la mémorisation) est élevé.

Les données sont appariées. L'hypothèse testée est que le Score du premier essai (S-E1) sera différent de celui du second essai (S-E2) :

- Pour le groupe A, un t-test est réalisé. Il n'y a pas de différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 37625$, $SD = 5852$) et S-E2 ($M = 38667$, $SD = 12021$), $t(23) = -0,494$, $p = 0,626$.
- Pour le groupe B, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs des scores S-E2, $MD = 2285,71$, étaient statistiquement différente de la médiane des rangs S-E1 : $Z = -2,954$, $p = 0,003$.
- Pour le groupe C, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs S-E2, $MD = -4954,55$, n'est pas différente statistiquement de la médiane des rangs S-E1 : $Z = -1,769$, $p = 0,079$.

Il y a une amélioration (+2,769%) entre S-E1 et S-E2 pour le groupe A ainsi que pour le groupe B (+12,669%) et le groupe C (+8,535%) bien que seul le groupe B ait montré une différence significative entre les scores E1 et E2.

4.2.2.2.1.1.2 Différence Scores entre groupes ($\Delta S-E2-E1$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les scores E2 et E1. Cela donne un $\Delta S-E2-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta S-E2-E1$. Tous suivaient une distribution normale.

Les données sont indépendantes. Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de la variance montre que l'effet de l'appareil (PC ou HMD) et de l'imagerie affichée (bi-oculaire ou binoculaire) sur l'évolution du score en jeu entre E1 et E2 n'est pas significatif [$F(2,66) = 1,181$, $p = 0,313$].

Les scores en jeu E1 et E2 du groupe B sont statistiquement différents. Il n'y a pas de différence significative pour les groupes A et C. L'hypothèse nulle peut être rejetée pour la différence entre E1 et E2 uniquement pour le groupe B. La tendance des médianes indique que la condition B a

enregistré un meilleur apprentissage suivi de la condition C et enfin de la condition A. Par conséquent, H1 peut être partiellement soutenue via la variable de score entre les deux essais du groupe B. H4 peut être soutenue car la condition B (HMD-S3D) montre un apprentissage statistiquement significatif, contrairement à la condition C (PC).

4.2.2.2.1.2 Temps de réponse performance

4.2.2.2.1.2.1 *Différence Temps de réponse E1-E2 dans chaque groupe*

Le Shapiro-Wilk Test a été réalisé pour tester la distribution de chaque groupe. Toutes les données E1 et E2 suivent une distribution normale (TdR-E1 : A, $p = 0,265$; B, $p = 0,233$; C, $p = 0,637$; TdR-E2 : A, $p = 0,289$; B, $p = 0,089$; C, $p = 0,053$).

Les données sont appariées. Plus le Temps de Réponse est bas, plus l'apprentissage est élevé. Un t-test a été réalisé pour comparer le temps nécessaire aux sujets pour répondre aux questions du premier essai (E1) et du second essai (E2). L'hypothèse testée est que le Temps de Réponse du premier essai (TdR-E1) sera différent de celui du second essai (TdR-E2) donc que $TdR-E1 \neq TdR-E2$:

- Pour le groupe A, il y a une différence significative du temps de réponse des sujets pour TdR-E1 ($M = 12,72$, $SD = 3,24$) et TdR-E2 ($M = 8,44$, $SD = 2,19$), $t(23) = 7,35$, $p = <0,001$. Le groupe A met 4,281 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.
- Pour le groupe B, il y a une différence significative du temps de réponse des sujets pour TdR-E1 ($M = 11,48$, $SD = 2,47$) et TdR-E2 ($M = 7,66$, $SD = 1,72$), $t(21) = 7,84$, $p = <0,001$. Le groupe B met 3,818 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.
- Pour le groupe C, il y a une différence significative du temps de réponse des sujets pour TdR-E1 ($M = 7,99$, $SD = 1,29$) et TdR-E2 ($M = 5,23$, $SD = 1,35$), $t(22) = 12,72$, $p = <0,001$. Le groupe C met 2,763 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.

Les sujets ont mis moins de temps à répondre dans les trois conditions lors du second essai par rapport au premier essai.

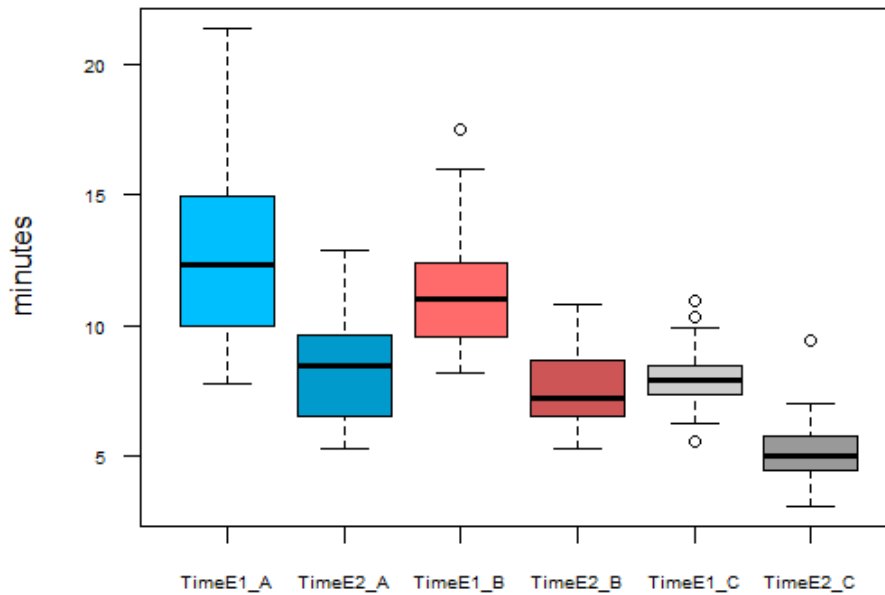


Figure 64 : Exp1, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre premier (E1) et second (E2) essai dans chaque groupe

4.2.2.2.1.2.2 Différence Temps de réponse entre groupes ($\Delta TdR-E2-E1$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les Temps de Réponse E2 et E1. Cela donne un $\Delta TdR-E2-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta TdR-E2-E1$. Tous suivaient une distribution normale.

Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de la variance montre que l'effet de l'appareil (PC ou HMD) et de l'imagerie affichée (bi-oculaire ou binoculaire) sur les temps de réponse des différences entre E1 et E2 ($\Delta TdR-E2-E1$) n'est pas significatif [$F(2,66) = 2,91, p = 0,062$]. La tendance des médianes indique que les participants dans la condition A ont enregistré un meilleur apprentissage suivi de la condition B et enfin de la condition C (voir Figure 64).

H_{exp1} peut être partiellement soutenu via l'évolution de la variable de temps de réponse entre le premier (TdR-E1) et deuxième (TdR-E2) essais. Cependant, la différence de temps de réponse n'est pas significativement différente lorsque les conditions sont testées d'un groupe à l'autre. H_{exp14} n'est soutenu que partiellement car les conditions A et B montrent une courbe d'apprentissage qui a tendance à être supérieure à C bien que non statistiquement significative. Le groupe avec PC dès le premier essai est presque aussi performant que les groupes avec HMD en brut.

4.2.2.2.1.3 Synthèse performance d'apprentissage

Afin de mesurer la performance d'apprentissage, deux métriques sont utilisées : scores (S) en jeu et temps de réponse (TdR). Le même jour, les sujets procèdent à deux essais du serious game (E1 et E2). Uniquement le score du groupe B (HMD-S3D) est statistiquement différent entre E1 et E2. La différence des courbes d'apprentissage ($\Delta S-E1-E2$) entre les groupes n'est pas statistiquement significative. Les 3 groupes ont un temps de réponse significativement différent entre E1 et E2. En revanche, il n'y a pas de différence statistiquement significative pour les courbes d'apprentissages ($\Delta TdR-E1-E2$).

4.2.2.2.2 Rétention

La rétention a été mesurée 1 mois après les deux premiers essais. Une partie des sujets se sont désistés de l'étude, réduisant l'échantillon. 42 sujets ont participé à la seconde partie de l'étude (voir Tableau 13) : soit une perte de 27 sujets sur les trois groupes. L'échantillon restant comprend 22 femmes et 20 hommes âgés de 18 à 39 ans, $M = 25 \pm 0,75$ ($SD = 4,82$) ans. 24 sujets n'avaient pas de correction et 18 avaient des lunettes ou des lentilles correctrices. Parmi ceux-ci, 11 étaient atteints de myopie, 2 d'astigmatisme, 4 de myopie et d'astigmatisme combinés et 1 d'hypermétropie et d'astigmatisme.

Tableau 13 : Expérience 1, répartition sujets restants pour rétention

Condition	Nombre de sujets
A	12
B	15
C	15

4.2.2.2.2.1 Scores rétention

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution des scores en jeu de chaque groupe S-E1, S-E2 ainsi que S-E3 à l'image de la performance (section précédente). Certains suivent une distribution normale d'autres non. **Nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques afin de tester la différence de score en jeu entre chaque essai au sein de chaque groupe.** Plus le score dans le jeu est élevé, plus l'apprentissage (la mémorisation) est élevé.

4.2.2.2.2.1.1 Différence Scores E3-E1 & E3-E2 dans chaque groupe

Les données sont appariées. Nous comparerons les scores entre le premier essai (S-E1) et le troisième essai (S-E3) puis entre le second essai (S-E2) et le troisième essai (S-E3) :

- Pour le groupe A, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 39083$, $SD = 6022$) et E3 ($M = 43250$, $SD = 8761$), $t(11) = -2,25$, $p = 0,045$. Il n'y a pas de différence significative des scores en jeu entre S-E2 ($M = 41833$, $SD = 10718$) et E3, $t(11) = -0,606$, $p = 0,557$.
- Pour le groupe B, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre E1 ($M = 42200$, $SD = 6505$) et G3 ($M = 47800$, $SD = 4858$), $t(14) = -2,54$, $p = 0,024$. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs S-E3, $MD = 2200$, n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs S-E2 : $Z = -1,107$, $p = 0,280$.
- Pour le groupe C, un t-test est réalisé. Il n'y a pas de différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 41867$, $SD = 7110$) et S-E3 ($M = 44533$, $SD = 8887$), $t(14) = -1,34$, $p = 0,200$. Un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs S-E3, $MD = 7461,54$, n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs S-E2 : $Z = -1,2579$, $p = 0,220$.

Il y a une amélioration (+ 10,66%) entre S-E3 et S-E1 ainsi qu'entre S-E3 et S-E2 (+ 3,38%) pour le groupe A. Il y a une amélioration (+ 13,27%) entre S-E3 et S-E1 ainsi qu'entre S-E3 et S-E2 (+ 5,75%) pour le groupe B. Il existe une amélioration (+ 6,37%) entre S-E3 et S-E1 mais une dégradation entre S-E3 et S-E2 (-4,16%) pour le groupe C (voir Figure 65). Pour chaque

groupe, aucune différence significative n'est trouvée entre le deuxième (S-E2) et le troisième essai (S-E3) en termes de scores en jeu. Cependant, la différence entre le premier (S-E1) et le troisième (S-E3) essai est significativement différente pour les groupes A et B (conditions en HMD), mais pas pour le groupe C (condition PC).

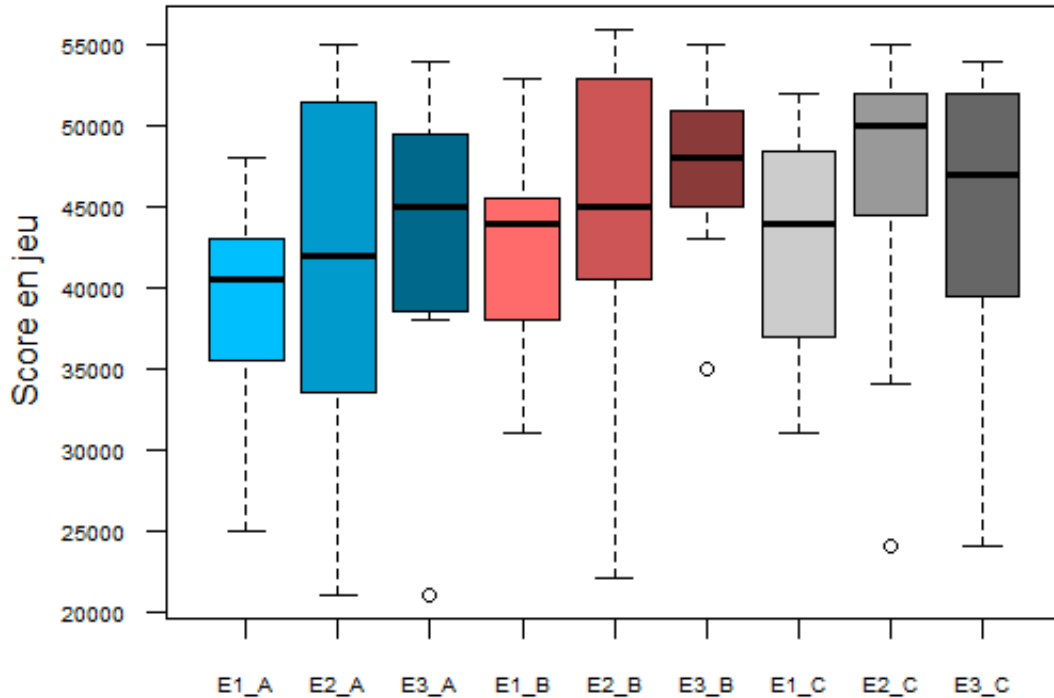


Figure 65 : Exp1, boîtes à moustache différence de Scores en jeu (rétention) entre les 3 essais dans chaque groupe

4.2.2.2.1.2 Différence Scores entre groupes ($\Delta S-E3-E1$ & $\Delta S-E3-E2$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les scores S-E2 et S-E1. Cela donne un $\Delta S-E2-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta S-E2-E1$. Tous suivaient une distribution normale.

Les données sont indépendantes. Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. L'analyse de la variance montre que l'effet de l'appareil (PC ou HMD) et de l'imagerie affichée (bi-oculaire ou binoculaire) sur l'évolution du score en jeu entre S-E2 et S-E3 n'est pas significative [$F(2) = 1,05$, $p = 0,359$]. Un Kruskal-Wallis test indique qu'il n'y a pas de différence significative de $\Delta S-E3-E1$ entre les groupes ($H(0,943) = 2$, $p = 0,624$), avec un rang moyen de 16,916 pour le groupe A, 19,466 pour le groupe B et 13,2 pour le groupe C.

4.2.2.2.2 Temps de réponse rétention

4.2.2.2.2.1 Différence Temps de réponse E3-E1 et E3-E2 dans chaque groupe

Le test de Shapiro-Wilk est réalisé pour tester la distribution du temps de réponse (TdR) à chaque essai au sein de chaque groupe. Seules les données E3 du groupe B suivent une distribution normale. Les données sont en minutes. **Nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques afin de tester la différence de TdR entre chaque essai au sein de chaque groupe.**

Les données sont appariées. Plus le temps est bas, plus l'apprentissage est performant. Nous comparerons les temps entre le premier essai (TdR-E1) et le troisième essai (TdR -E3) puis entre les second essai (TdR -E2) et le troisième essai (TdR -E3) :

- Pour le groupe A, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs TdR-E3 du temps de réponse, MD = 6,29, n'est pas statistiquement différente de la médiane du temps de réponse TdR-E2, $Z = -1,286$, $p = 0,622$. Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E3, MD = 6,29, est statistiquement différente de la médiane des rangs du temps de réponse E1 : $W = -1,287$, $p = <0,001$.
- Pour le groupe B, un t-test t est réalisé. Il y a une différence significative du temps de réponse des sujets entre TdR-E1 (M = 11,86, SD = 2,80) et TdR-E3 (M = 7,78, SD = 2,29), $t(14) = 5,702$, $p = <0,001$. Il n'y a pas de différence significative du temps de réponse entre TdR-E2 (M = 7,76, écart-type = 1,76) et TdR-E3, $t(14) = -0,029$, $p = 0,977$.
- Pour le groupe C, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E3, MD = -2,45, est statistiquement différente de celle de la médiane des rangs TdR-E2 : $Z = -3,351$, $p = <0,001$. Un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E3, MD = 0,61, n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E1 $Z = -1,533$, $p = 0,135$.

Testant la différence de temps de réponse entre TdR-E2 et TdR-E3 (un mois plus tard), seul le groupe C (PC) montre une différence statistiquement significative. Les sujets du groupe C a mis plus de temps à répondre en TdR-E3 qu'en TdR-E2 indiquant donc un effet négatif sur la courbe d'apprentissage. Les groupes A et B indiquent que le temps de réponse, bien que légèrement plus élevé lors de TdR-E3 se sont globalement maintenus par rapport à TdR-E2. Voir Figure 66.

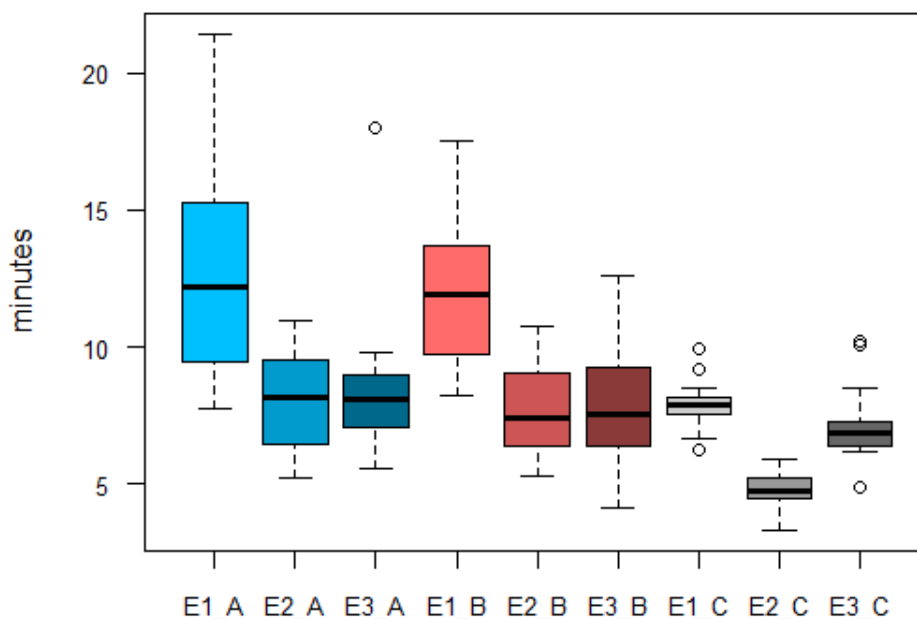


Figure 66 : Exp1, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre les 3 essais dans chaque groupe

4.2.2.2.2.2 Différence Temps de réponse entre groupes ($\Delta TdR-E3-E1$ & $\Delta TdR-E3-E2$)

Afin de tester les données entre groupes, nous avons soustrait les temps TdR-E3 et TdR-E2. Cela donne un $\Delta TdR-E3-E2$. Les résultats sont testés avec le test de Shapiro-Wilk : tous suivaient une distribution normale. Puis, nous avons soustrait les temps de réponse TdR-E3 et TdR-E1. Cela donne un $\Delta TdR-E3-E1$. Les résultats sont testés avec le test de Shapiro-Wilk : les groupes A et C suivaient une distribution normale mais pas le groupe B.

Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de variance montre que l'effet de l'appareil (PC ou HMD) et de l'imagerie affichée (bi-oculaire ou binoculaire) sur les temps de réponse $\Delta TdR-E3-E2$ est significatif [$F(4,55) = 2, p = 0.017$]. Des tests post-hoc sans correction sont effectués pour obtenir des détails de comparaison entre les groupes. La différence entre les groupes A et B n'est pas significative. La différence entre les groupes A et C est significative (MD = -1,773, SE = 0,860) $Z = -3,125, p = <0,001$. La différence entre les groupes B et C est significative (MD = -2,362, SE = 0,811) $Z = -3,453, p = <0,001$. La comparaison post-hoc des groupes ne montre aucune différence significative entre les groupes avec HMDs (A et B) mais une différence significative entre les groupes avec HMDs et le groupe contrôle (PC). Par conséquent, H3 peut être soutenu mais pas H4 sur la base de la différence de temps de réponse entre E3 et E2.

Un Kruskal-Wallis test indique qu'il existe une différence significative de $\Delta TdR-E3-E1$ entre les groupes ($H(14,81) = 2, p = <0,001$) avec un rang moyen de 16,416 pour le groupe A, 15,8 pour le groupe B et 31,267 pour le groupe C. Post-Hoc La comparaison post-hoc des groupes ne montre pas de différence significative entre les groupes avec HMDs (A et B) mais une différence significative entre les groupes testés ($A \neq C p = 0,002, B \neq C p = <0,001$) et le groupe contrôle (PC). Voir Figure 67.

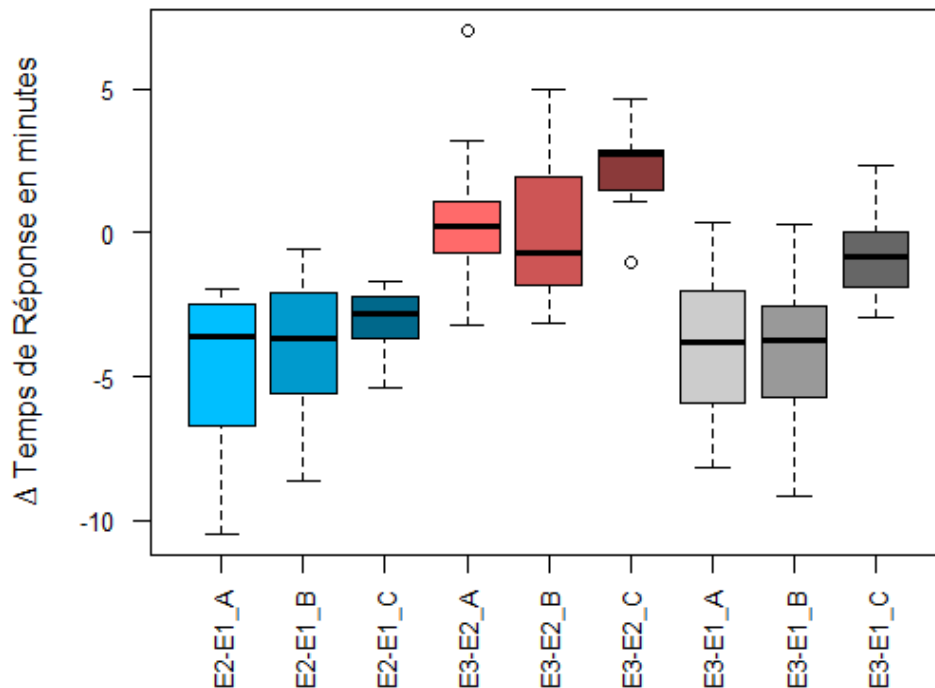


Figure 67 : Exp1, boîtes à moustache différence de $\Delta TdR-E3-E1$ et $\Delta TdR-E3-E2$ entre groupes

4.2.2.2.3 Synthèse rétention apprentissage

Aucune différence significative n'est trouvée entre le deuxième (S-E2) et le troisième essai (S-E3) en termes de scores en jeu pour tous les groupes. La différence entre le premier (S-E1) et le troisième (S-E3) essai est significativement différente pour les groupes A et B (conditions en HMD), mais pas pour le groupe C (condition PC).

Le groupe A a mis en moyenne 36,48 secondes de plus à répondre en TdR-E3 qu'en TdR-E2 mais 4,019 minutes de moins en TdR-E3 que pour le TdR-E1. Le groupe B a mis en moyenne 1,166 seconde de plus pour répondre en TdR-E3 que pour le TdR-E2 mais 5,11 minutes de moins en TdR-E3 que pour le TdR-E1. Le groupe C a mis 2,338 minutes de plus pour répondre en TdR-E3 qu'en TdR-E2 mais 50,99 secondes de moins en TdR-E3 qu'en TdR-E1. Le temps de réponse brut est meilleur pour la condition contrôle (PC) : voir Figure 67.

4.2.2.2.3 Synthèse des résultats d'apprentissage

$H_{\text{exp}1}$: Les courbes d'apprentissage attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game sont moins efficaces lorsque les apprenants présentent une fatigue visuelle, peut être soutenue. $H_{\text{exp}4}$: les courbes d'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game sont plus élevées avec un HMD qu'avec un PC, peut être soutenue.

4.2.2.3 Qualité d'expérience

Tous les questionnaires ont été complétés après les deux essais (après les 30 minutes) et les mesures optométriques post-exposition.

4.2.2.3.1 Présence

Les 10 items de la Multimodal Presence Scale de Makransky *et al.* sont combinés pour tester la présence dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le niveau de présence rapporté est élevé. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 3,80 non significative ($p = 0,150$). Les médianes des trois groupes sont identiques ($M = 3$). Les sujets ont donc évalué leur présence sociale et spatiale globale de la même manière.

4.2.2.3.2 Flow

Les 9 items de la Flow Short Scale de Rheinberg, Vollmeyer et Engeser ont été combinés pour tester le Flow dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le niveau de flow rapporté est élevé. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 1,03, non significative ($p = 0,598$). Les médianes des trois groupes sont identiques ($M = 4$). Les sujets ont donc évalué leur flow global de la même manière.

4.2.2.3.3 Inconfort Visuel

Les 11 items du questionnaire de Zeri et Livi sont combinés pour tester le confort visuel dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le nombre de sujets signalant un inconfort visuel est important. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 34,8, significative ($p < 0,001$). Un test post-hoc Pair-wise Durbin-Cornover est réalisé. Il révèle :

- aucune différence significative de confort visuel entre le groupe A ($M = 1,81$, $SD = 0,998$) et le groupe B ($M = 1,76$, $SD = 0,933$), $p = 0,626$,
- une différence significative de confort visuel entre le groupe A et le groupe C ($M = 1,38$, $SD = 0,688$), $p = <0,001$,
- une différence significative de confort visuel entre le groupe B et le groupe C, $p = <0,001$.

L'inconfort visuel globale est faible chez les sujets : les médianes allant de 1 à 2. Cependant, lorsque les groupes sont comparés les uns aux autres, il existe une différence significative d'inconfort. La comparaison appariée des groupes montre que la différence est significative lorsque la condition de contrôle PC (C) est comparée aux conditions HMDs (A et B). Les groupes avec HMD rapportent donc un plus grand inconfort visuel.

4.2.2.3.4 Synthèse des résultats pour la qualité d'expérience

La présence et le flow sont identiques entre les 3 groupes. En revanche, l'inconfort visuel est plus élevé avec les HMDs et l'écran PC. L'hypothèse H_{exp12} : la fatigue visuelle détériore la qualité d'expérience lors de l'apprentissage en serious game, est soutenue sur la base de l'inconfort visuel. En effet, les mesures optométriques montrent une fatigue visuelle plus élevée avec les HMDs et l'inconfort visuel est rapporté comme plus élevé avec ces conditions.

4.2.2.4 Corrélations entre variables

La plupart des mesures suivent une distribution non normale. Nous utilisons le rho de Spearman afin de tester la dépendance statistique entre les variables. Il s'agit de tester la corrélation éventuelle entre la variation (covariance) d'un marqueur de fatigue visuelle et de performance d'apprentissage. **La plupart n'indiquent aucune covariance entre les variables mesurées.** Lorsque nous avons testé l'addition du temps de réponse des deux premiers essais (TdR-E1 + TdR-E2) à l'évolution du point le plus proche d'accommodation (ΔPPA) de tous les groupes additionnés ensemble : une corrélation est identifiée. Rangs X : Moyenne : 46, Dev standard : 26,41 ; Rangs Y : Moyenne : 46, Dev standard : 26,38. Combiné : Covariance = $20991,5 / 90 = 233,24$; $R = 233,24 / (26,41 * 26,38) = 0,335$. La valeur de R est 0,33477 et la valeur bilatérale de **P est 0,001**. L'association entre les deux variables serait considérée comme statistiquement significative. Il y a donc covariance du temps de réponse cumulé et l'évolution du PPA.

4.2.3 Résultats Exp1

4.2.3.1 Fatigue visuelle

Nous avons évalué la fatigue visuelle via 6 mesures optométriques. Les images binoculaires entraîne davantage de fatigue visuelle que les images bi-oculaires (H_{exp13}) sur la base de punctum proximum d'accommodation, de l'acuité stéréoscopique, de la facilité d'accommodation, mais non de l'acuité visuelle.

Le Punctum Proximum d'Accommodation est particulièrement touché avec notre dispositif. Les PPAs sont significativement différents entre pre- et post-exposition pour les 3 groupes. La comparaison post-hoc a montré que la différence est significative entre les conditions HMDs et PC, mais pas entre imagerie binoculaire (groupe B) et l'imagerie bi-oculaire (groupe A).

Pourtant, les tendances des médianes montrent que le S3D entraîne une fatigue visuelle plus élevée basée sur le PPA. L'acuité stéréoscopique est impactée de manière statistiquement significative uniquement pour le groupe A. La facilité d'accommodation ne peut soutenir H_{exp13} que sur la base des différences de médianes. L'acuité visuelle pre- et post-exposition baissent en conditions HMD mais il n'y a pas de différence entre les groupes. Pourtant, la tendance des médianes montre que la S3D entraîne une fatigue visuelle plus élevée sur base de l'acuité visuelle.

Pour toutes les variables optométriques, la différence entre les groupes A et B n'est pas statistiquement significative. Cela peut s'expliquer par le fait que les objets de notre scène en profondeur/relief étaient le texte et les cases que les sujets devaient sélectionner pour répondre. Ces cases n'étaient pas toujours à l'écran : les scènes de dialogue (lorsque l'ami et le recruteur discutent) ne montraient aucun objet en profondeur. De plus, les tâches du serious game ne nécessitent pas des mouvements amples de la tête et il y a très peu d'objets en mouvement dans la scène. De plus, le conflit entre accommodation et vergence est léger, ce qui entraînait un faible stress visuel. En outre, les sujets ont ajusté les HMDs et la distance entre l'écran et leurs yeux de manière autonome. Ainsi, ces réglages n'étaient peut-être pas adaptés à leurs caractéristiques, influençant le stress visuel lors de la condition bi-oculaire. Nos résultats sont cohérents avec les travaux précédents (Mon-Williams *et al.*, 1993 ; Mon-Williams & Wann, 1998 ; Rushton & Riddell, 1999 ; Ujike & Watanabe, 2015) montrant que les HMD ont un impact plus négatif sur le système visuel humain que les écrans d'ordinateur. Les scènes et les tâches demandant plus de mouvements et avec des objets plus en profondeur peuvent entraîner une fatigue visuelle plus importante dans des conditions S3D que dans des conditions d'images bi-oculaires.

4.2.3.2 Efficacité d'apprentissage

Nous avons évalué l'apprentissage et les courbes d'apprentissage à travers deux métriques : les scores en jeu (S) et le temps de réponse (TdR). L'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche en serious game 1) n'est pas moins efficace lorsque les apprenants présentent une fatigue visuelle uniquement en tendance, ce qui ne permet pas de soutenir H_{exp11} et 2) est plus élevé avec HMDs qu'avec un écran d'ordinateur, ce qui permet de soutenir H_{exp14} .

Cela s'explique par le fait que les interactions au sein du serious game étaient presque similaires entre les conditions. En ce qui concerne le temps de réponse et la fatigue visuelle ($H1$), les trois groupes ont pris moins de temps, de manière statistiquement significative, au cours de leur deuxième essai (TdR-E2) comparé à leur premier essai (TdR-E1). Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les groupes. La tendance médiane montre que les groupes avec HMD (A et B) ont eu un meilleur apprentissage que le groupe contrôle avec PC. Il y a donc une tendance allant dans le sens de H_{exp11} . L'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche en serious game à **tendance** à être moins efficace lorsque les apprenants présentent une fatigue visuelle : le groupe A a obtenu de meilleurs résultats que le groupe B. L'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un SG est plus élevé avec HMD qu'avec un écran d'ordinateur car les courbes d'apprentissage sont meilleures en condition A et B qu'en condition C.

En ce qui concerne la comparaison entre les conditions avec HMDs et l'écran d'ordinateur ($H_{\text{exp}14}$) : les conditions A et B montrent un meilleur apprentissage que C, bien que non statistiquement significatif. Nos résultats peuvent être expliqués par les habitudes d'interaction homme-machine des sujets. Les participants ont plus l'habitude d'utiliser un PC qu'un HMD. Par conséquent, les sujets pourraient être plus efficaces, dès le premier essai, dans leurs interactions avec le serious game avec la condition PC. Cela est en lien avec l'expertise des modalités d'interaction. Donc, la courbe d'apprentissage pourrait être plus importante avec les conditions HMD car elle est liée à l'expertise du dispositif plutôt qu'aux effets directs du dispositif.

4.2.3.3 Qualité d'expérience

Nous avons évalué la qualité d'expérience au moyen de 3 questionnaires : présence, flow, inconfort visuel. $H_{\text{exp}2}$ est soutenue : la fatigue visuelle a une incidence négative sur la qualité d'expérience sur la base de la mesure d'inconfort visuel. Par conséquent, seul l'inconfort visuel soutient notre hypothèse concernant l'impact négatif de la fatigue visuelle sur la qualité d'expérience.

4.2.3.4 Condition D stéréoscopie excessive

Le groupe D (stéréoscopie excessive) a été exclu des tests statistiques. La condition aurait du subir une phase de pré-test, elle manquait donc de contrôle. Une explication réside dans la valeur de disparité rétinienne retenue comme excessive sur la base de la littérature précédente. Les valeurs issues de la littérature ont été obtenues soit il y a une trentaine d'année soit avec des dispositifs autres que les HMDs, soit avec de petites populations ou soit par déduction mais sans base statistiques. Nous avons retenu 1.6° car de toutes les sources, il s'agissait de la valeur la plus élevée. Par le manque de contrôle sur cette condition, nous avons donc préféré ne pas l'inclure dans les tests statistiques réalisés. D'autres apports seraient nécessaires afin de délimiter la disparité rétinienne la plus excessive avant diplopie avec différents dispositifs d'affichage stéréoscopiques. Dans notre cas les HMDs.

4.2.4 Conclusion Exp1

4 hypothèses de travail ont été posées : $H_{\text{exp}1}$: Les courbes d'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game sont moins efficaces lorsque les apprenants présentent une fatigue visuelle. $H_{\text{exp}2}$: la fatigue visuelle détériore la qualité d'expérience lors de l'apprentissage en serious game. $H_{\text{exp}3}$: l'imagerie binoculaire (S3D) conduit à plus de fatigue visuelle que l'imagerie bi-oculaire (2D). $H_{\text{exp}4}$: les courbes d'apprentissage des réponses attendues lors d'un entretien d'embauche dans un serious game sont plus élevées avec un HMD qu'avec un PC.

Notre étude montre que les courbes d'apprentissage des sujets sont plus efficaces lors de l'utilisation d'HMD que sur un écran d'ordinateur. Cependant, la fatigue visuelle a tendance à être plus élevée lors de l'utilisation d'HMD. Cette fatigue visuelle a tendance à avoir des impacts négatifs sur les performances d'apprentissage. La qualité de l'expérience subit un impact négatif via le confort visuel avec les HMDs par rapport à l'écran d'ordinateur. Néanmoins, il n'y a pas de différence significative entre l'imagerie binoculaire et bi-oculaire. La présence et le flow étaient similaires entre les conditions testées et contrôle. Comme nos résultats montrent que la fatigue visuelle a tendance à être plus élevée avec l'imagerie binoculaire, ne pas utiliser la S3D

pour un serious game avec de faibles interactions visuo-spatiales pourrait être un moyen d'éviter de telles limites et d'améliorer la qualité d'expérience de l'utilisateur. Cette solution ne serait toutefois pas satisfaisante pour les utilisateurs expérimentés ou pour apprendre certaines tâches qui tirent généralement parti de la S3D : e.g. les compétences en chirurgie. Ainsi, trouver un moyen de maintenir l'imagerie S3D en réduisant son impact devrait également faire l'objet d'études. Étant donné que la S3D peut s'avérer nécessaire en fonction des attentes en matière d'apprentissage, il convient d'explorer des solutions logicielles visant à réduire la fatigue visuelle. C'est le but de notre seconde expérience dont les résultats sont restitués ci-après.

4.3 EXPERIENCE 2 : STEREOSCOPIE CYCLIQUE POUR REDUIRE LA FATIGUE VISUELLE

Comme établi précédemment, la stéréoscopie est associée à de la fatigue visuelle en VR (voir section 2.3.3.2.1). Notre première expérience indique que cette fatigue visuelle est présente avec les HMDs de nouvelle génération affichant de la stéréoscopie. Pourtant, la stéréoscopie peut s'avérer nécessaire dans certains contextes d'apprentissage. Il a été proposé de n'afficher les contenus en stéréoscopie que de façon partielle pendant l'expérience, on parle de stéréoscopie intermittente ou cyclique (voir sections 2.3.5.2.2 & 3.6).

Notre seconde expérience propose d'explorer cette stratégie et de comparer des imageries afin d'abaisser le stress visuel en HMD : binoculaire (S3D) *versus* binoculaire cyclique toutes les 1 minute (S3D1c) *versus* binoculaire cyclique toutes les 3 minutes (S3D3c). Nous y traitons les apports nécessaires identifiés (voir section 2.5) : [A1], [A2], [A3] et [A4]. Cette expérience 2 a fait l'objet de 1 communication scientifique : (Souchet, Philippe, Ober, Lévêque, & Leroy, 2019b).

4.3.1 Conditions expérimentales Exp2

Trois conditions expérimentales sont testées (voir Figure 68) :

Condition A : HMD binoculaire (appelée classique). Les images binoculaires sont deux images avec parallaxe entre les deux (stéréoscopie). La disparité est fixée de manière moyenne en fonction de la distance inter-pupillaire selon les recommandations d'Oculus.

Condition B : HMD binoculaire cyclique chaque minute. Toutes les minutes, l'imagerie passe de binoculaire à bioculaire (les mêmes images sur chaque écran sans disparité).

Condition C : HMD binoculaire cyclique toutes les 3 minutes. Toutes les 3 minutes, l'imagerie passe de binoculaire à bioculaire (les mêmes images sur chaque écran sans disparité).

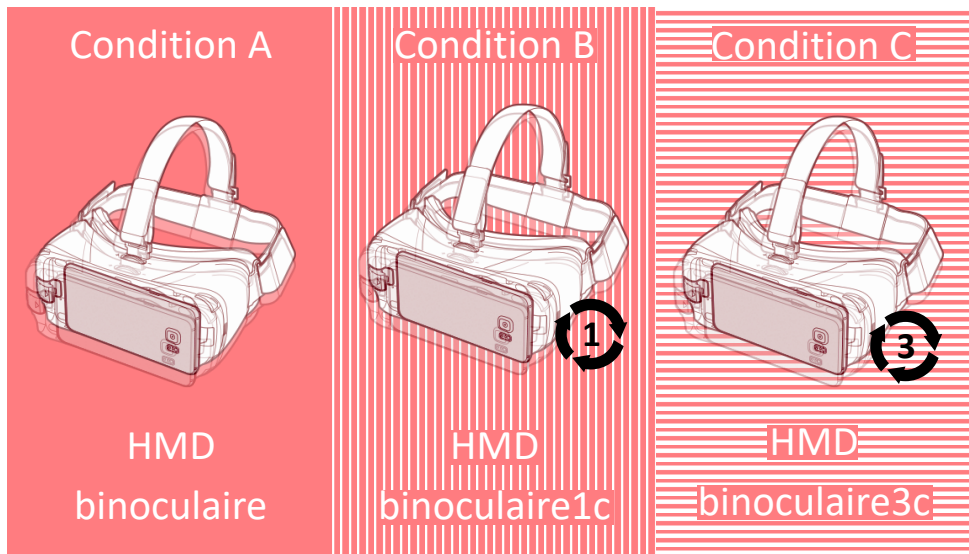


Figure 68 : Résumé des conditions expérimentales Exp2

4.3.1.1 Matériel d'exposition

Pour les trois conditions, un HMD Samsung Gear VR est utilisé avec un smartphone Samsung S6 (voir section 3.7).

4.3.1.1.1 Algorithme de Stéréoscopie cyclique

Le but de la stéréoscopie cyclique est de relaxer la vergence. Ainsi, d'assurer la covariance avec l'accommodation sur le même plan. L'apport d'Emoto *et al.*, concernant l'oscillation de la disparité pour les TV affichant de la stéréoscopie, montre que les sujets peuvent percevoir des changements même très rapides (Emoto *et al.*, 2005). Leurs cycles de changement dans l'image se déroulent toutes les 5 secondes. Ils maintiennent donc l'affichage avec des disparité pendant 5 secondes. Nous avons conduit des pre-tests avec $N = 10$ sujets, non inclus dans le reste de l'expérience afin de valider les temps d'affichage de la stéréoscopie cyclique et celui des cycles (t et d dans notre équation). L'objectif est de s'assurer que les sujets ne peuvent pas percevoir le changement d'imagerie. Pour passer de la bioculaire à la stéréoscopie avec Unity 3D, nous avons simplement programmé une boucle pour passer d'un état à l'autre. L'interpolation se produit à chaque image (frame) pour modifier progressivement l'échelle de l'objet qui contient la caméra (frustum).

Avec Unity 3D nous avons utilisé la fonction `Mathf.Lerp`⁸. L'échelle des caméras est modifiée dynamiquement. Échelle = 1 équivaut au réglage de parallaxe selon les recommandations d'Oculus. Échelle ≈ 0 correspond aux deux caméras sans parallaxe. L'interpolation est linéaire du début (stéréoscopie) jusqu'à l'échelle cible (bioculaire) :

$$(s_{max} - s_{min}) * \frac{t}{d} + s_{min}$$

⁸ Unity - Scripting API: `Mathf.Lerp`. *Docs.unity3d.com*, 2018 [online]. Available at: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Mathf.Lerp.html> [Accessed 29 Nov. 2018].

s_{min} = Starting Scale, s_{max} = Reach Scale, t = Time spent since the beginning of a loop, d = Duration of the loop.

Les valeurs d (duration of the loop) ont été testées à 10, 15, 20 et 22 secondes avec 10 sujets lors de pré-tests. À la suite des pre-tests, la durée (duration) et timing ont été établis comme suit :

- $t = 22$ secondes
- $d = 5$ secondes.

L'interpolation linéaire de 22 secondes n'a pas été détectée par les 10 sujets des pre-tests, d'où ce choix. Les 5 secondes de durée se basent sur les travaux d'Emoto *et al.* puis Ware afin de s'assurer que les sujets ne percevaient pas de changements dans l'imagerie, car cela pourrait avoir une incidence sur leur qualité d'expérience (Emoto *et al.*, 2005 ; Ware *et al.*, 1995). La boucle change l'image et maintient l'état en 49 secondes. Nous donnons 11 secondes au système visuel pour se reposer après la boucle comme Emoto *et al.* ont montré que les changements trop rapides peuvent être détectés par l'homme. Nous avons doublé leurs 5 secondes en maintenant l'état après modification de l'imagerie et ajouté 1 seconde pour arrondir les cycles et le maintien. Nous donc obtenus un cycle total de 1 minute. Concernant les cycles de 3 minutes, nous avons considéré le repos de 3 minutes utilisé par Guo *et al.* qui semblait efficace toutes les 20 minutes (J. Guo *et al.*, 2019). Deux cycles de 1 et 3 minutes sont donc employés (voir Figure 69).

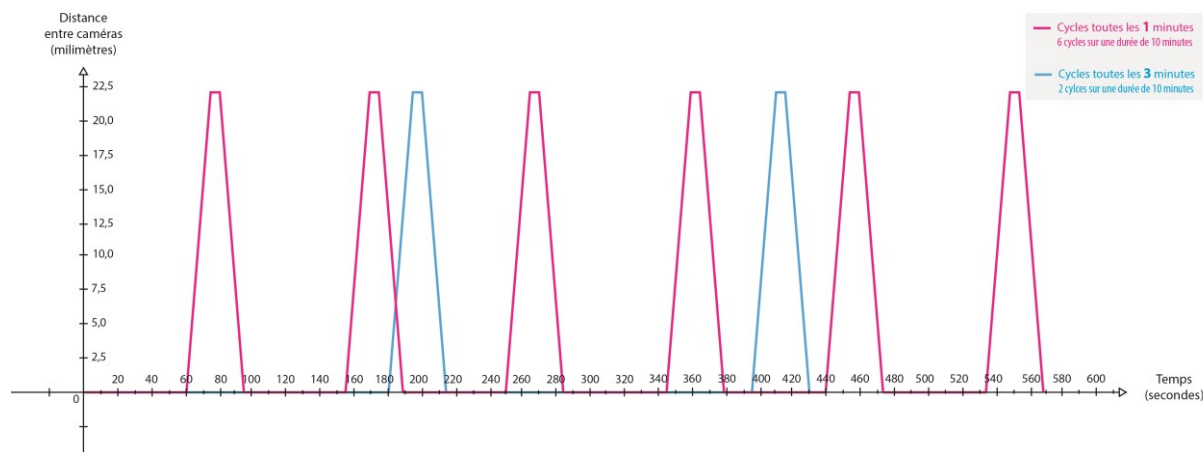


Figure 69 : schéma d'activation stéréoscopie cyclique – distance entre les caméras en fonction du temps

4.3.1.2 Procédure et Mesures

4.3.1.2.1 Mesures

Les 5 mesures optométriques présentées en section 3.4 sont opérées pre- et post- exposition. L'Acuité stéréoscopique est mesurée avec le TNO. La capacité de vergence n'est pas mesurée dans cette expérience (voir Discussion 5.5.1). Le Point de fusion (disparité positive, négative) et Rupture de fusion (disparité positive, négative) sont mesurés via haploscope « virtuel ». La rapidité d'accommodation est mesurée via le Flipper Lens Test (+2,00/-2,00). Le Punctum Proximum d'Accommodation est mesuré via le Donder's Push-Up Test. L'Acuité visuelle est mesurée via le E de Raskin.

En jeu le score, le nombre de bonne/mauvaise/moyenne réponses et le temps de réponse sont enregistrés. Ces mesures sont opérées pour les 3 essais (E1 et E2 le même jour puis E3 1 mois

plus tard). Nous considérons qu'un apprentissage (performance) correspond à un meilleur score (mémoire court terme des bonnes ou mauvaises réponses obtenues lors de E1) et/ou un temps moins long de réponse lors de E2 comparé à E1. La même logique est suivie pour l'apprentissage long terme (rétention) en comparant E2 à E3. Le delta entre chaque essai correspond à la courbe d'apprentissage.

La présence est évaluée à travers le questionnaire « Multimodal Presence Scale » (Makransky *et al.*, 2017). Le flow est évalué à travers le questionnaire « Flow Short Scale » (Engeser & Rheinberg, 2008). L'Inconfort Visuel est évalué via le questionnaire de Zeri et Livi (Zeri & Livi, 2015).

4.3.1.2.2 Design, Randomisation et Simple aveugle

L'expérience suit un **design inter-sujet, randomisé et en simple aveugle**. L'investigateur principal met en œuvre tout le protocole et connaît les conditions auxquelles sont exposés les sujets. La randomisation est opérée avec QuickCalc⁹ par GraphPad Software (CA, USA). Les sujets ne connaissent par leur assignation afin de prévenir tout effet Placebo ou Nocebo. L'expérimentation se déroule dans les locaux de Manzalab : 108 rue Saint-Honoré 75001 paris. Voir Figure 70.

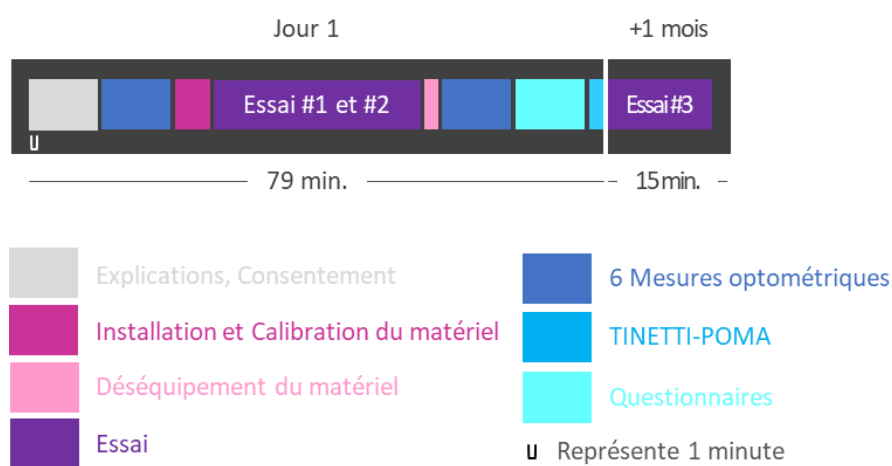


Figure 70 : Schéma déroulé de l'Expérience 2

4.3.1.3 Participants

60 (59 utilisés dans les statistiques) sujets ont pris part à cette expérience. L'échantillon est composé de 32 femmes et de 28 hommes âgés de 18 à 38 ans, $M = 23,81 \pm 0,64$ ($SD = 4,84$) ans. Ces sujets remplissent les critères d'inclusion établis en section 3.8. Les sujets sont essentiellement des étudiants (psychologie, digital, ressources humaines, ergonomie) ainsi que des chercheurs.

Un questionnaire de profil a été soumis avant la participation à l'expérience afin de connaître le rapport aux dispositifs auxquels les sujets seraient exposés : voir Figure 71, et le rapport à l'entretien d'embauche : voir Figure 72. Voir Annexe 5.

⁹ QuickCalcs 2018 [en ligne]. Consultable à : <https://www.graphpad.com/quickcalcs/randomize1.cfm> [Accédé 23 Septembre 2019]

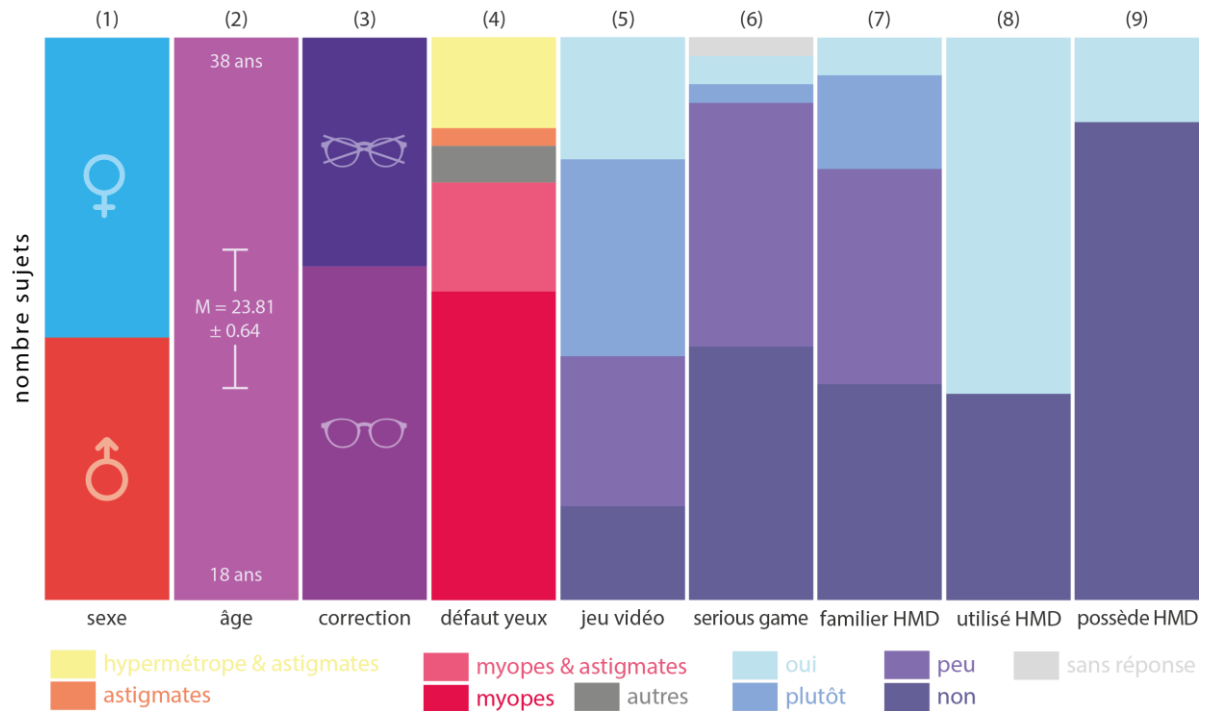


Figure 71 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil Exp2. (1) 32 femmes et 28 hommes. (2) âgés de 18 à 38 ans, $M = 23,81 \pm 0,64$ ($SD = 4,84$) ans. (3) 26 sujets ne portent aucune correction et 34 portent soit des lunettes soit des lentilles. (4) 17 présentent une myopie, 6 une myopie et une astigmatie combinés, 1 une astigmatie, 4 une hypermétropie, 5 une hypermétropie et astigmatie combinés et 2 autres défauts. (5) « Avez-vous ou avez-vous eu une pratique soutenue des jeux vidéo ? » : non = 10, peu = 16, plutôt = 21, oui = 13. (6) « Estimez-vous être familier des serious games ? » : non = 27, peu = 26, plutôt = 2, oui = 3, n'ont pas répondu = 2. (7) « Estimez-vous être familier des casques de réalité virtuelle ? (Card-Board, Oculus Rift, HTC Vive Playstation VR, Samsung Gear VR...) » : non = 23, peu = 23, plutôt = 10, oui = 4. (8) « Possédez-vous un casque de réalité virtuelle ? » : non = 51, oui = 9. (9) « Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle ? » : non = 22, oui = 38.

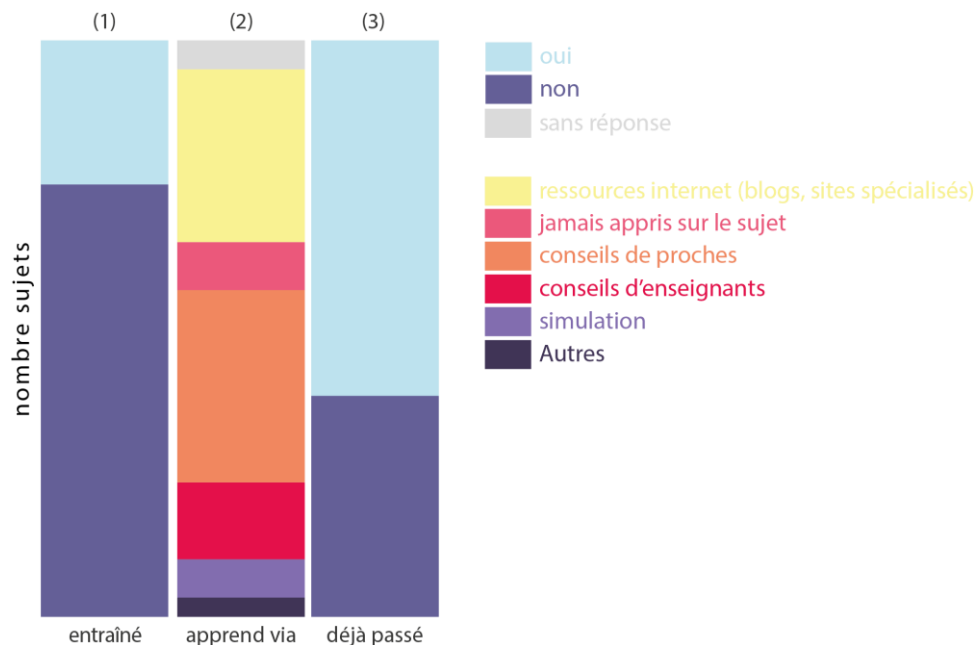


Figure 72 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil entretien d'embauche Exp2. (1) « Vous êtes-vous déjà entraîné à passer un entretien d'embauche ? » : non = 23, oui = 37. (2) « Lorsque vous devez trouver un emploi / un stage, quelle approche privilégiez-vous pour apprendre les meilleures pratiques à adopter lors d'un entretien d'embauche ? » : Conseils de vos enseignants = 8, Conseils de vos proches = 20, Je n'ai jamais appris sur ce sujet = 5, Ressources internet (blogs, ressources internet (blogs, sites spécialisés) = 5, jamais appris sur le sujet = 5, conseils de proches = 20, conseils d'enseignants = 8, simulation = 8, Autres = 8.

sites spécialisés) = 18, Simulation = 4, Autres = 2, n'ont pas répondu = 3. (3) « Avez-vous déjà passé un entretien d'embauche ? » : non = 8, oui = 50, n'ont pas répondu = 2.

4.3.1.4 Aspects éthiques et rémunération

Ce protocole de recherche a fait l'objet d'une validation du CER Paris Descartes (voir section 3.9). 20 € de compensation pour chaque sujet sous forme de chèque cadeau Amazon sont distribués après l'envoi des résultats du dernier essai 1 mois (E3) après le premier passage.

4.3.1.5 Analyses et Statistiques

Les tests statistiques sont opérés d'une part dans chaque condition (comparaison mesures pre- et -post exposition puis comparaison E1/E2 et E2/E3) et d'autre part entre les groupes (courbes d'apprentissage, deltaE1/E2/E3 puis comparaison QoE). **Le niveau de significativité est testé avec un $\alpha = 0,05$.** Le logiciel Jamovi version 0.9.5.12 (2018) a été utilisé pour réaliser les tests statistiques. Le logiciel R version 3.5.2 (2018-12-20) a été utilisé pour réaliser les graphiques.

4.3.1.6 Hypothèses de travail

H_{exp21} : les variables optométriques diffèrent entre pre- et post-exposition avec l'imagerie S3D cyclique dans un SG via VR-HMD

H_{exp22a} : la S3D classique entraîne une fatigue visuelle différente de la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD

H_{exp22b} : la S3D cyclique affichée chaque 1 minute conduit à une fatigue visuelle différente de la S3D cyclique affichée chaque 3 minutes dans un SG via VR-HMD

H_{exp23} : l'apprentissage s'améliore entre le premier (E1) et le deuxième essai (E2) avec la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD

H_{exp24} : les courbes d'apprentissage sont plus élevées avec la S3D cyclique comparée à la S3D classique dans un SG via VR-HMD

H_{exp25} : la qualité d'expérience est différente entre la S3D cyclique et la S3D classique dans un SG via VR-HMD

4.3.2 Données collectées et analyses statistiques Exp2

La répartition aléatoire des sujets dans chaque groupe a été assurée grâce à l'affectation par bloc réalisée avec GraphPad (voir Tableau 14). Un sujet a été retiré des analyses statistiques pour causes de mesures mal opérées.

Tableau 14 : Expérience 2, résultat de la répartition aléatoire des sujets par condition

Condition	Nombre de sujets
A	20
B	19
C	20

Un abandon d'un certain nombre de sujets sur la seconde partie de l'expérience (1 mois plus tard) est constaté. Nous décrivons la population restante en section 4.3.2.2.2.

4.3.2.1 Fatigue visuelle

4.3.2.1.1 Acuité stéréoscopique (AS)

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Seul les mesures post-exposition du groupe A suivent une distribution normale, aucune autre mesure pre- et post-exposition ne suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence d'acuité stéréoscopique entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucun ne suivait une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence le Δ AS entre les groupes.**

4.3.2.1.1.1 Différence pre- et post-exposition dans chaque groupe

Les données sont appariées. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour chaque groupe. Moins le score est élevé, moins l'acuité stéréoscopique est bonne. L'hypothèse testée est que l'acuité pre- sera différente de celle post-exposition.

L'acuité stéréoscopique dans le groupe A n'a diminué que légèrement de -4,59% (Wilcoxon Signed-Rank test, $p = 0,382$), le groupe C a diminué de -1,94% (Wilcoxon Signed-Rank test, $p = 0,588$), tandis que le groupe B a augmenté de + 2,11% (Wilcoxon Signed-Rank test, $p = 0,688$), en moyenne entre les mesures pre- et post-exposition. Nous n'avons pas observé de différences statistiques dans l'acuité stéréoscopique pre- et post-exposition dans chaque groupe.

Voir Figure 73.

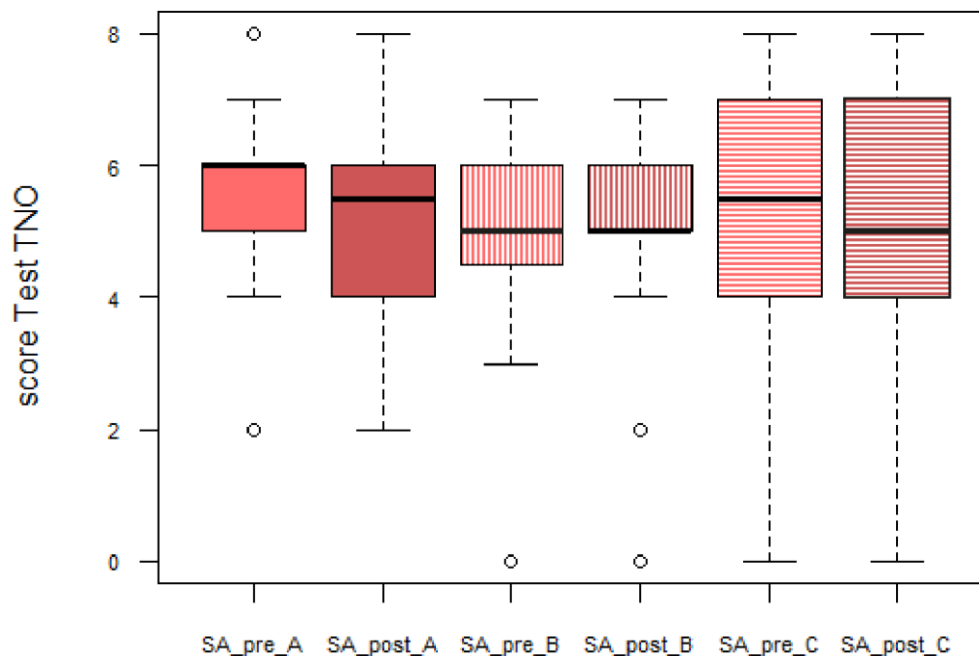


Figure 73 : Exp2, boîtes à moustache différence d'acuité stéréoscopique entre pre- et post-exposition dans chaque groupe

4.3.2.1.1.2 Différence entre groupes (Δ AS)

Les mesures pre- et post-exposition sont soustraites pour obtenir un Δ AS. Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis Test est utilisé afin de tester la différence de Δ AS entre les groupes. L'hypothèse testée est que la différence d'acuité entre pre- et post-exposition sera différente entre conditions, soit respectivement groupe $A \neq B \neq C$ avec une tendance pour les groupes $A > B > C$. Le Kruskal-Wallis Test indique qu'il n'y a pas de différence significative ($H(1,79) = 2, p = 0,417$).

Voir Figure 74.

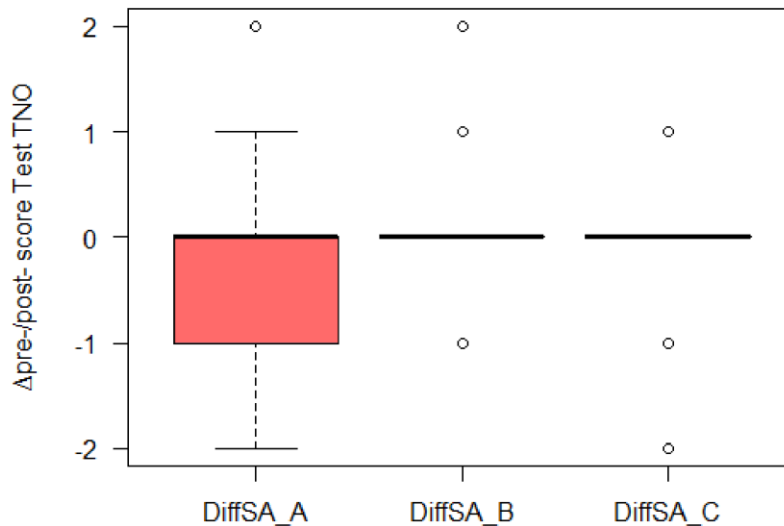


Figure 74 : Exp2, boîtes à moustache différence Δ AS entre les groupes

4.3.2.1.1.3 Synthèse des résultats

Des tests non paramétriques ont été opérés suivant les résultats des Shapiro-Wilk test indiquant que la plupart des variables ne suivaient pas une distribution normale. Nous avons testé la différence d'acuité stéréoscopique pre- et post-exposition pour chaque groupe avec le Wilcoxon Signed-Ranks Test. Il n'a indiqué aucune différence statistiquement significative pour les 3 groupes. Le Kruskal-Wallis Test a indiqué qu'il n'y a pas de différence significative entre le delta d'acuité stéréoscopique pre- et post-exposition entre les groupes. **Les résultats de la différence d'acuité stéréoscopique ne permettent pas de soutenir $H_{\text{exp}21}$ ni $H_{\text{exp}22a}$ et b.**

4.3.2.1.2 Acuité Visuelle (AV)

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Aucune mesure pour les données récoltées avant et après exposition ne suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence d'acuité visuelle entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des scores entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucun ne suivait une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester le Δ AV entre les groupes.**

4.3.2.1.2.1 Différence pre-/post-exposition dans chaque groupe

Les données sont appariées, aussi le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour chaque groupe. Moins le score est élevé, moins l'acuité visuelle est bonne. L'hypothèse testée est que l'acuité post- sera différente de celle pre-exposition.

Groupe A : HMD-S3D

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z =$ les données sont trop liées, $p = 1,00$. On constate ainsi que l'acuité visuelle du groupe A reste inchangée entre pre- et post-exposition : 0% en moyenne entre pre- et post-exposition. Les 20 sujets obtiennent des scores similaires.

Groupe B : HMD-S3D-1c

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test unilatéral a indiqué que la médiane des rangs pre-exposition, $Md = 0,03$, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -2,45$, $p = 0,01$. L'acuité visuelle du groupe B chute de -90,91% en moyenne entre pre- et post-exposition. 11 sujets sur 19 (57,89%) montrent une chute, les 9 autres n'ont pas modifié leur score.

Groupe C : S3D-3c

Un Wilcoxon Signed-Ranks Test bilatéral a indiqué que la médiane des rangs, $Md = -0,27$, pre-exposition n'est pas statistiquement plus grande que la médiane des rangs post-exposition $W = -0,73$, $p = 0,48$. L'acuité stéréoscopique du groupe C chute de -16,67% entre pre- et post-exposition. 5 sujets sur 20 (25%) montrent une chute tandis que la majorité 14 sur 20 (75%) ne montre pas de différence.

Voir Figure 75.

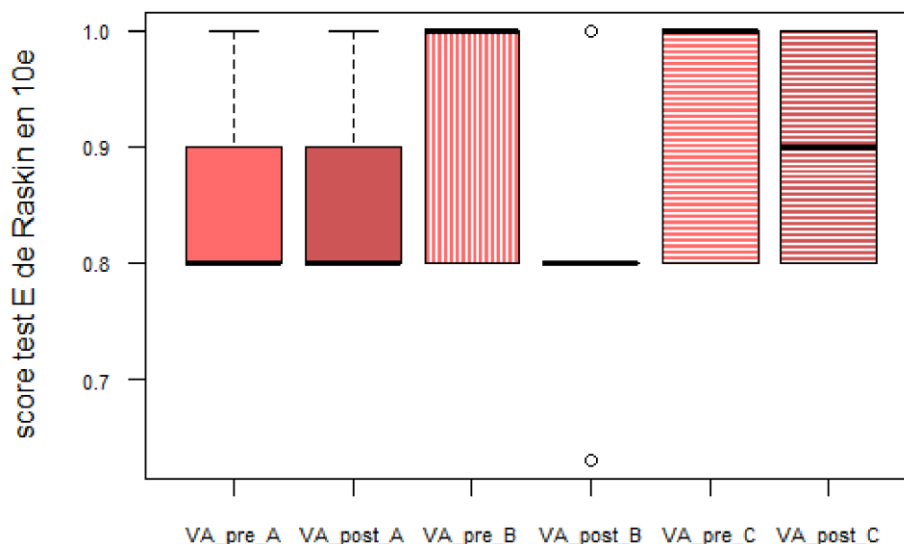


Figure 75 : Exp2, boîtes à moustache différence d'acuité visuelle entre pre- et post-exposition dans chaque groupe

4.3.2.1.2.2 Différence entre groupes (ΔAV)

Les mesures pre- et post-exposition sont soustraites pour obtenir un ΔAV . Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-

exposition entre les groupes. Moins le score est élevé, moins l'acuité visuelle est bonne. L'hypothèse testée est que ΔAV sera différente entre chaque groupe, soit respectivement groupe $A \neq B \neq C$ avec une tendance groupe $C < B < A$.

Le Kruskal-Wallis Test indique qu'il n'y a une différence statistiquement significative de ΔAV entre les groupes ($H(6,52) = 2$, $p = 0,04$) avec un rang moyen de 34,75 pour le groupe A, 23,05 pour le groupe B et 31,85 pour le groupe C. Un Dunn's Post-Hoc tests sans correction est tout de même appliqué pour comparer les groupes entre eux par paire. Il y a une différence statistiquement significative entre les groupes A et B ($MD = 0,11$, $SE = 0,04$) $W = -3,45$, $p = 0,015$. La différence entre groupes A et C ($MD = 0,05$, $SE = 0,04$) $W = -1,04$, $p = 0,46$ et groupes B et C ($MD = 0,13$, $SE = 0,04$) $W = -0,853$, $p = 0,10$ n'est pas significative. Voir Figure 76.

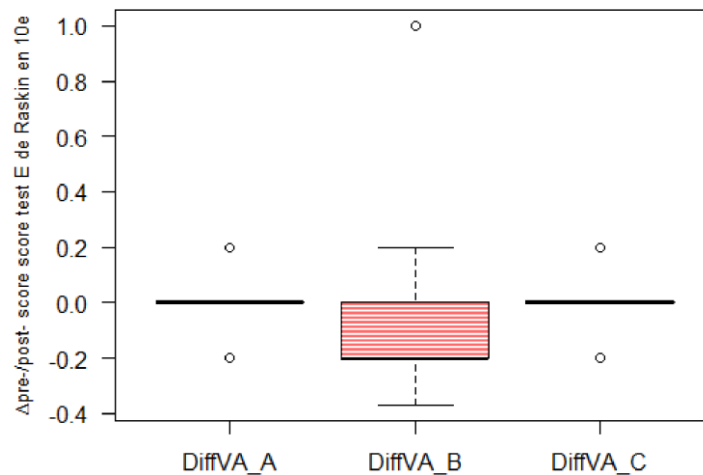


Figure 76 : Exp2, boîtes à moustache différence ΔAV entre les groupes

4.3.2.1.2.3 Synthèse des résultats

Des tests non paramétriques ont été opérés suivant les résultats des Shapiro-Wilk test indiquant que la plupart des variables ne suivaient pas une distribution normale. Le Wilcoxon Signed-Ranks Test a indiqué que l'acuité visuelle pre- et post-exposition est significativement différente pour le groupe B mais pas les A et C. Le Kruskal-Wallis Test a indiqué qu'il y a une différence significative de ΔAV entre les groupes. Des Post-Hocs tests ont montré qu'il y a une différence significative entre le ΔAV des groupes A et B mais pas dans les autres comparaisons. Sur la base de l'acuité visuelle, la stéréoscopie cyclique avec des cycles d'une minute (groupe B) semble plus fatigante que la stéréoscopie classique (groupe A). La stéréoscopie cyclique avec des cycles de 3 minutes a tendance à être plus fatigante que la stéréoscopie classique bien que moins fortement que la stéréoscopie cyclique avec des cycles de 1 minute. Les résultats de la différence d'acuité visuelle permettent de soutenir H_{exp21} et H_{exp22a} et b.

4.3.2.1.3 Punctum Proximum d'Accommodation (PPA)

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données récoltées pre- et post-exposition du groupe A (pre- $p = 0,079$, post- $p = 0,198$) et B (pre- $p = 0,409$, post- $p = 0,728$) suivent une distribution normale mais pas le groupe C. **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques pour les groupes A et B puis non-paramétriques pour le groupe B afin de tester la différence du point le plus proche d'accommodation entre pre- et post-exposition.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre

pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : chaque delta des groupes suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons un test paramétrique afin de tester la différence Δ PPA entre les groupes.**

4.3.2.1.3.1 Différence pre-/post-exposition

Les données sont appariées, aussi le Wilcoxon Signed-Ranks Test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour les groupes C puis un T-test pour les groupes A et B. Plus la mesure est élevée, plus le PPA est élevé (donc plus les yeux sont incapables d'accommoder proche). L'hypothèse testée est que le point le plus proche d'accommodation post- sera différent de celui pre-exposition.

Groupe A : HMD-S3D

Un t-test indique une différence significative entre les mesures pre- ($M = 69,40$, $SD = 12,27$) et post-exposition ($M = 87,00$, $SD = 14,72$), $t(20) = -9,17$, $p = <0,001$. Le PPA du groupe A chute de +20,23% entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (20) montrent une chute.

Groupe B : HMD-S3D-1c

Un t-test indique une différence significative entre les mesures pre- ($M = 67,37$, $ET = 11,40$) et post-exposition ($M = 87,37$, $ET = 18,95$), $t(19) = -7,60$, $p = <0,001$. Le PPA du groupe B chute de -20,23% entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (19) montrent une chute.

Groupe C : HMD-S3D-3c

Un Wilcoxon Signed-Rank test indique que la médiane des rangs pre-exposition, $MD = -18,5$, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = -3,92$, $p = <0,001$. Le PPA du groupe B chute de -21,39% entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (19) montrent une chute. Voir Figure 77.

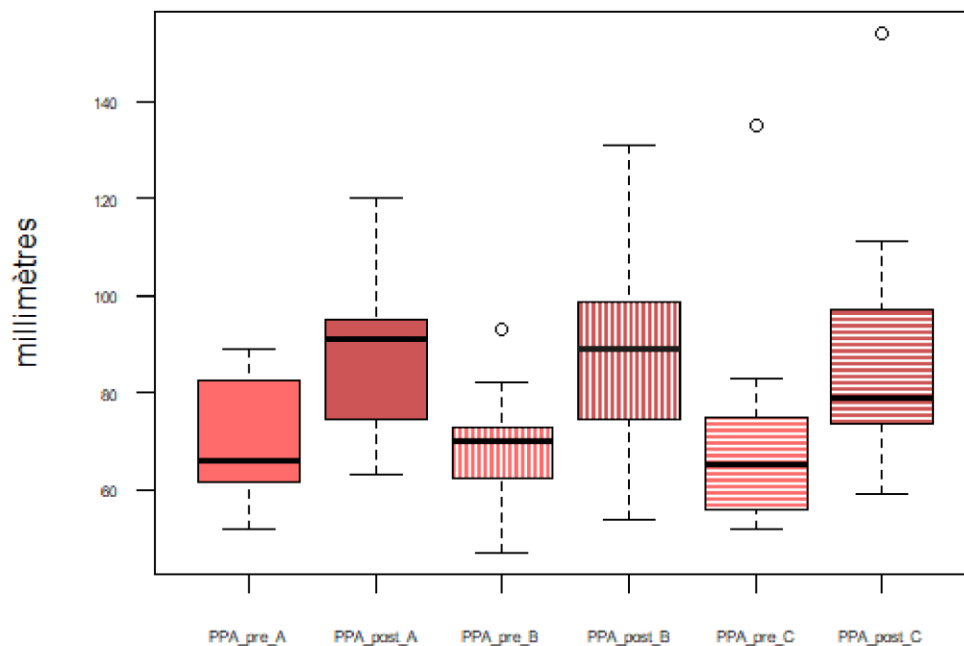


Figure 77 : Exp2, boîtes à moustache différence de PPA entre pre- et post-exposition dans chaque groupe

4.3.2.1.3.2 Différence entre groupes (Δ PPA)

Les données sont indépendantes. Un one way ANOVA entre les sujets est réalisé. L'analyse de variance montre que l'effet de l'imagerie (stéréoscopie ou stéréoscopie cyclique toutes les 1 minutes ou 3 toutes les minutes) sur le Δ PPA entre chaque groupe n'est pas significatif [$F(2) = 0,25, p = 0,77$]. Voir Figure 78.

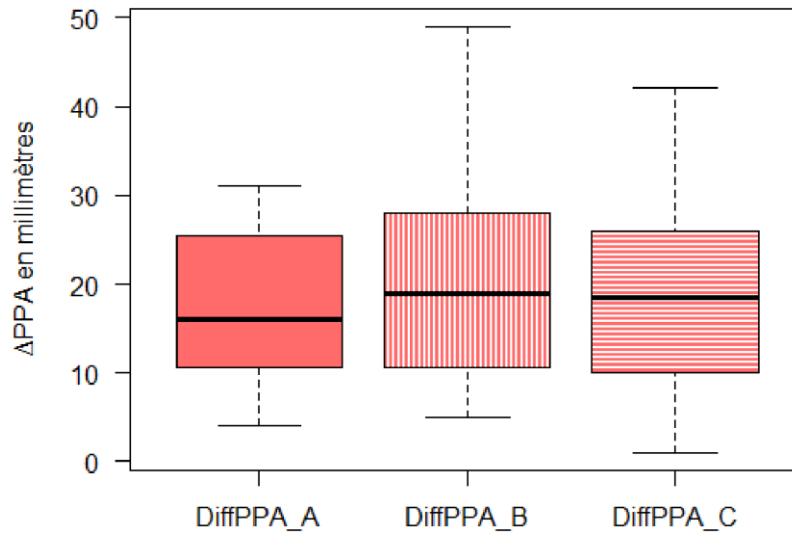


Figure 78 : Exp2, boîtes à moustache différence Δ PPA entre les groupes

4.3.2.1.3.3 Synthèse des résultats

Le PPA des groupes A, B et C augmente de manière significative entre la pre-exposition et la post-exposition, révélant un impact négatif de l'exposition pour chaque imagerie affichée. La Δ PPA entre les groupes A, B et C n'a pas varié différemment, ce qui indique une inefficacité de la stéréoscopie cyclique pour réduire la fatigue visuelle. Les résultats de la différence de PPA permettent de soutenir $H_{\text{exp}21}$ mais pas $H_{\text{exp}22a}$ et b .

4.3.2.1.4 Point de Fusion et Point de Rupture (PF-PR)

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données récoltées pre- et post-exposition ne suivent pas une distribution normale pour la plupart. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence des Point de Fusion (PF) et Rupture (PR) entre pre- et post-exposition.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : aucun ne suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence Δ PF-N, Δ PF-P, Δ PR-N et Δ PR-P entre les groupes.**

Concernant le Point de Rupture *Positif* du groupe B : un Wilcoxon Signed-Rank test indique que la médiane des rangs pre-exposition, $MD = 0,031$, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = 167, p = 0,002$. Le PR-P du groupe B chute de -12,87% entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (19) montrent une chute.

Concernant le Point de Rupture *Négatif* du groupe B : un Wilcoxon Signed-Rank test indique que la médiane des rangs pre-exposition, MD = 0,020, est statistiquement différente de la médiane des rangs post-exposition $Z = 172$, $p = < 0,001$. Le PR-P du groupe B chute de -9,68% entre pre- et post-exposition. Tous les sujets (19) montrent une chute.

4.3.2.1.4.1 Synthèse des résultats

Seul le groupe B montre une variation et uniquement du point de rupture. Les autres mesures opérées avec l'Haploscope et avec les autres groupes ne montrent pas de différence statistiquement significative. Aucun des tests opérés pour tester la différence Δ PF-N, Δ PF-P, Δ PR-N et Δ PF-P entre les groupes n'indique une différence statistiquement significative. Cela permet de soutenir assez partiellement H_{exp21} et H_{exp22a} et b.

4.3.2.1.5 **Facilité d'accommodation (FA)**

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données récoltées pre- et post-exposition de tous les groupes suivent une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques afin de tester la différence de facilité d'accommodation entre pre- et post-exposition pour chaque groupe.** Afin de comparer les groupes entre eux, la soustraction des mesures entre pre- et post- a été opérée pour obtenir un delta (Δ) puis la distribution a été testée avec le Shapiro-Wilk test : seul le delta du groupe A suit une distribution normale. **C'est pourquoi nous utilisons des tests non paramétriques afin de tester la différence Δ FA entre les groupes.**

4.3.2.1.5.1 Différence pre-/post-exposition

Les données sont appariées, aussi le t-test a été utilisé afin de tester la différence entre pre- et post-exposition pour les 3 groupes. Moins la valeur est élevée, moins la FA est élevée. L'hypothèse testée est que la facilité d'accommodation post- sera différente de celle pre-exposition. Le t-test indique qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative pour les 3 groupes. Le groupe A montre une très légère amélioration (+3,37 %), le groupe B montre une très légère chute (-3,16%) de même que le groupe C (-1,16%).

4.3.2.1.5.2 Différence entre groupes (Δ FA)

Les données sont indépendantes. Le Kruskal-Wallis test indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes pour le Δ FA pre- et post-exposition ($H(0,924) = 2$, $p = 0,630$).

4.3.2.1.5.3 Synthèse des résultats

La tendance médiane indique que la condition B est la plus fatigante, suivie de la condition C et enfin que la condition A montre une amélioration. Cependant, les résultats ne sont pas statistiquement significatifs. Les hypothèses H_{exp21} et H_{exp22a} et b ne peuvent donc pas être soutenues.

4.3.2.1.6 **Synthèse des résultats pour la fatigue visuelle**

Nous avons mesuré la fatigue visuelle induite par l'imagerie (HMD-S3D ou HMD-S3D-1c ou HMD-S3D-3c) via 5 tests optométriques.

H_{exp21} est soutenue : les variables optométriques diffèrent entre pre- et post-exposition avec l'imagerie S3D cyclique dans un SG via VR-HMD. H_{exp22a} est soutenue : la S3D classique

entraîne une fatigue visuelle différente de la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD. Cette différence est à la défaveur de la stéréoscopie cyclique. H_{exp2b} : la S3D cyclique affichée chaque 1 minute conduit à une fatigue visuelle différente de la S3D cyclique affichée chaque 3 minutes dans un SG via VR-HMD. La fatigue visuelle du groupe B (stéréoscopie chaque minute) a un impact négatif sur le stress visuel. Donc, plus la stéréopsie est activée, plus les sujets sont stressés visuellement.

Les résultats des tests statistiques effectués sur les mesures indiquent que la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute est plus fatigante que la stéréoscopie classique et la stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes. Cela se base sur le *punctum proximum* d'accommodation et l'acuité visuelle. De manière générale, soit la stéréoscopie cyclique ne diffère pas de la stéréoscopie classique soit elle a un impact négatif sur le système visuel lorsqu'affichée chaque minute. C'est l'inverse de l'effet recherché.

4.3.2.2 Apprentissage

Deux métriques sont utilisées : scores en jeu (S) et temps de réponse (TdR).

4.3.2.2.1 Performance

4.3.2.2.1.1 Scores performance

Les données correspondent au score en jeu allant de 0 à 63 000.

4.3.2.2.1.1.1 Différence Scores E1-E2 dans chaque groupe

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque groupe. Les données du premier essai (S-E1) du groupe A et C suivent une distribution normale (S-E1 : A, $p = 0,457$; C, $p = 0,097$) mais pas du groupe B (S-E1 : B, $p = 0,007$). Pour le second essai (S-E2) les données des 3 groupes suivent une distribution normale (S-E2 : A, $p = 0,345$; B, $p = 0,079$; B, $p = 0,162$). **C'est pourquoi nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques afin de tester la différence entre S-E1 et S-E2 dans chaque groupe.** Plus le score dans le jeu est élevé, plus l'apprentissage (la mémorisation) est élevé.

Les données sont appariées. L'hypothèse testée est que le Score du premier essai (S-E1) sera différent de celui du second essai (S-E2) donc que $S-E1 \neq S-E2$:

- Pour le groupe A, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 36750$, $SD = 8143$) et S-E2 ($M = 44450$, $SD = 9676$), $t(19) = -6,35$, **$p = <0,001$** .
- Pour le groupe B, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs des scores S-E2, $MD = -9500$, étaient statistiquement différente de la médiane des rangs S-E1 : $Z = 32,00$, **$p = 0,012$** .
- Pour le groupe C, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 43150$, $SD = 6098$) et S-E2 ($M = 51700$, $SD = 7241$), $t(19) = -4,48$, **$p = <0,001$** .

Tous les groupes améliorent leur score en jeu entre le premier et le second essai : groupe A +20,95%, groupe B +18,10% et groupe C +19,81%. Ces différences sont toutes statistiquement significatives. Voir Figure 79.

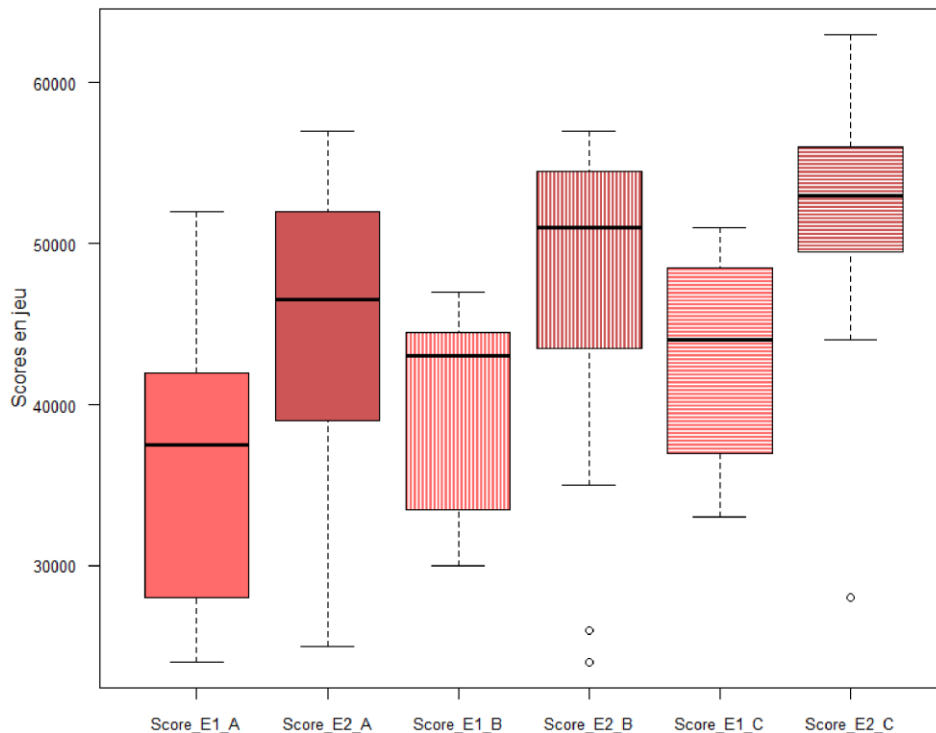


Figure 79 : Exp2, boîtes à moustache différence Scores en jeu premier (E1) et second (E2) essais dans chaque groupe

4.3.2.2.1.1.2 Différence Scores entre groupes ($\Delta S-E2-E1$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les scores E2 et E1. Cela donne un $\Delta S-E2-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta S-E2-E1$. Seul le $\Delta S-E2-E1$ du groupe A suit une distribution normale et ceux des groupes B et C non.

Le Kruskal-Wallis Test a été utilisé afin de tester la différence (Δ) entre pre- et post-exposition entre les groupes. L'hypothèse testée est que $\Delta S-E2-E1$ sera différente entre chaque groupe, soit respectivement groupe $A \neq B \neq C$ avec une tendance groupe $A < B < C$. Le Kruskal-Wallis Test indique qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative de $\Delta S-E2-E1$ entre les groupes ($H(0,55 = 2, p = 0,76)$) avec un rang moyen de 27,73 pour le groupe A, 31,76 pour le groupe B et 31,10 pour le groupe C.

Les scores en jeu S-E1 et S-E2 des 3 groupes sont statistiquement différents. H_{exp23} est soutenue sur la base du score en jeu. H_{exp24} n'est pas soutenue sur la base des $\Delta S-E2-E1$. Il y a un apprentissage entre le premier et le second essai pour tous les groupes dont ceux avec l'imagerie stéréoscopie cyclique. En revanche, aucune différence n'est identifiable dans les courbes d'apprentissage des 3 groupes sur la base du score en jeu.

4.3.2.2.1.2 Temps de réponse performance

4.3.2.2.1.2.1 Différence Temps de réponse E1-E2 dans chaque groupe

Le Shapiro-Wilk Test a été réalisé pour tester la distribution de chaque groupe. Toutes les données du temps de réponse du premier essai (TdR-E1) suivent une distribution normale (TdR-E1 : A, $p = 0,490$; B, $p = 0,290$; C, $p = 0,226$) mais seules les mesures du groupe B pour le

temps de réponse du second essai (TdR-E2) suivent une distribution normale (TdR-E2 groupe B, $p = 0,061$).

Les données sont appariées. Plus le Temps de Réponse est bas, plus l'apprentissage est élevé. Un t-test a été réalisé pour comparer le temps nécessaire aux sujets pour répondre aux questions du premier essai (E1) et du second essai (E2). L'hypothèse testée est que le Temps de Réponse du premier essai (TdR-E1) sera différent de celui du second essai (TdR-E2) donc que $TdR-E1 \neq TdR-E2$:

- Pour le groupe A, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs des scores S-E2, MD = 4,27, est statistiquement différente de la médiane des rangs S-E1 : $Z = -3,92$, $p = < 0,001$. Le groupe A met 2,88 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.
- Pour le groupe B, il y a une différence significative du temps de réponse des sujets pour TdR-E1 (M = 10.69, SD = 1.84) et TdR-E2 (M = 7.92, SD = 1.88), $t(11) = 5,96$, $p = < .001$. Le groupe A met 2,77 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.
- Pour le groupe C, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs des scores S-E2, MD = 1,83, étaient statistiquement différente de la médiane des rangs S-E1 : $Z = -3,30$, $p = < 0,001$. Le groupe C met 3,33 minutes de moins pour répondre lors de E2 comparé à E1.

Les sujets ont mis moins de temps à répondre dans les trois conditions lors du second essai par rapport au premier essai. Voir Figure 80.

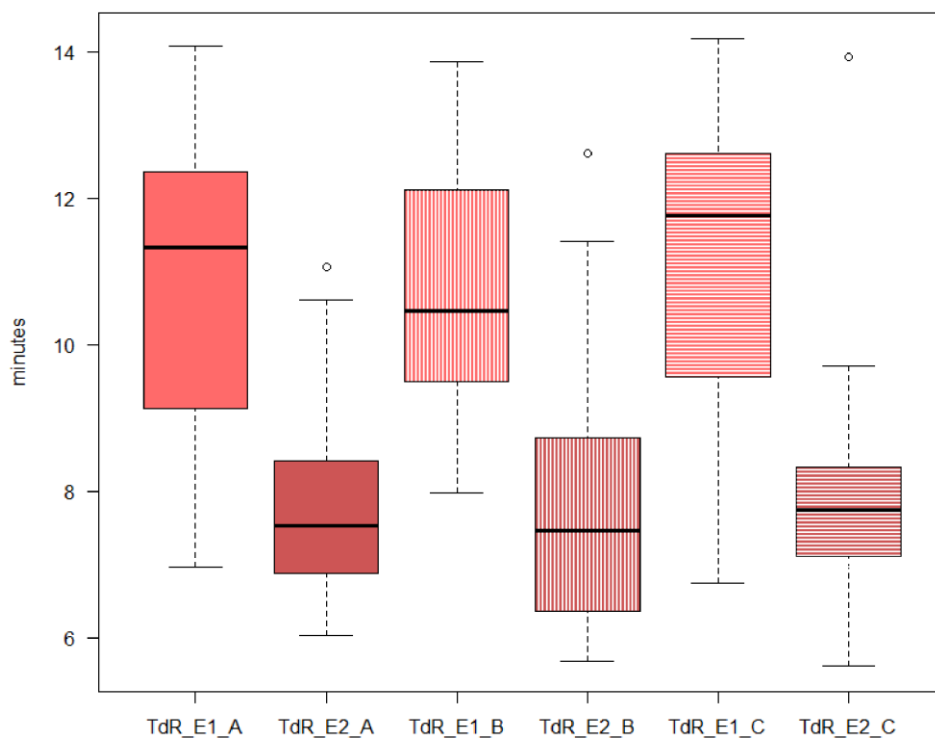


Figure 80 : Exp2, boîtes à moustache différence Temps de Réponse premier (E1) et second (E2) essais dans chaque groupe

4.3.2.2.1.2.2 Différence Temps de réponse entre groupes ($\Delta TdR-E2-E1$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les Temps de Réponse E2 et E1. Cela donne un $\Delta TdR-E2-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta TdR-E2-E1$. Tous suivaient une distribution normale.

Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de la variance montre que l'effet de l'imagerie affichée sur les temps de réponse $\Delta TdR-E2-E1$ n'est pas significatif [$F(2,56) = 0,45$, $p = 0,64$]. La tendance des médianes indique que les participants dans la condition C ont enregistré un meilleur apprentissage suivi de la condition B équivalent à A.

H_{exp23} est soutenue sur la base du temps de réponse. H_{exp24} n'est pas soutenue sur la base des $\Delta TdR-E2-E1$. Il y a un apprentissage entre le premier et le second essai pour tous les groupes dont ceux avec l'imagerie stéréoscopie cyclique. En revanche, aucune différence n'est identifiable dans les courbes d'apprentissage des 3 groupes sur la base du temps de réponse.

4.3.2.2.1.3 Synthèse performance d'apprentissage

Afin de mesurer la performance d'apprentissage, deux métriques sont utilisées : scores (S) en jeu et temps de réponse (TdR). Le même jour, les sujets procèdent à deux essais du serious game (E1 et E2). Le score en jeu des 3 groupes est statistiquement différent entre E1 et E2. La différence des courbes d'apprentissage ($\Delta S-E1-E2$) entre les groupes n'est pas statistiquement significative. Les 3 groupes ont un temps de réponse significativement différent entre E1 et E2. En revanche, il n'y a pas de différence statistiquement significative pour les courbes d'apprentissages ($\Delta TdR-E1-E2$).

4.3.2.2.2 Rétention

La rétention a été mesurée 1 mois après les deux premiers essais. Une partie des sujets se sont désistés de l'étude, réduisant l'échantillon. 49 sujets ont participé à la seconde partie de l'étude (voir Tableau 15) : soit une perte de 10 sujets sur les trois groupes. L'échantillon restant comprend 26 femmes et 23 hommes âgés de 18 à 34 ans, $M = 23,08 \pm 0,65$ ($SD = 4,52$) ans. 19 sujets n'avaient pas de correction et 30 avaient des lunettes ou des verres correcteurs. Parmi ceux-ci, 14 étaient atteints de myopie, 1 d'astigmatisme, 8 de myopie et d'astigmatisme combinés, 1 d'astigmatisme, 4 d'hypermétropie, 1 d'hypermétropie et d'astigmatisme et enfin 1 pour fatigue visuelle.

Tableau 15 : Expérience 2, répartition sujets restants pour rétention

Condition	Nombre de sujets
A	19
B	16
C	14

4.3.2.2.2.1 Scores rétention

Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution des scores en jeu de chaque groupe S-E1, S-E2 ainsi que S-E3 à l'image de la performance (section précédente). Tous ne suivent pas une distribution normale. **Nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques**

afin de tester la différence entre chaque essai de chaque groupe. Plus le score dans le jeu est élevé, plus l'apprentissage (la mémorisation) est élevé.

4.3.2.2.2.1.1 Différence Scores E3-E1 & E3-E2 dans chaque groupe

Les données sont appariées. Nous comparerons les scores entre le premier essai (S-E1) et le troisième essai (S-E3) puis entre le second essai (S-E2) et le troisième essai (S-E3) :

- Pour le groupe A, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre S-E2 ($M = 44737$, $SD = 9590.79$) et S-E3 ($M = 40684$, $SD = 6382.98$), $t(18) = 2,23$, $p = 0,04$. Il n'y a pas de différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 37263$, $SD = 8027$) et S-E3, $t(11) = -2,031$, $p = 0,057$.
- Pour le groupe B, un Wilcoxon Signed-Ranks Test est réalisé : la médiane des rangs S-E3, $MD = 15812,50$, n'est pas statistiquement différente de la médiane des rangs S-E2 : $Z = -0,41$, $p = 0,75$. Un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs S-E1, $MD = 9562.5$, est statistiquement différente de la médiane des rangs S-E3 : $Z = -1.991$, $p = 0,049$.
- Pour le groupe C, un t-test est réalisé. Il y a une différence significative des scores en jeu entre S-E2 ($M = 52929$, $SD = 5174,99$) et S-E3 ($M = 44857$, $SD = 8475,65$), $t(13) = 3,52$, $p = 0,002$. Un t-test est réalisé : il n'y a pas de différence significative des scores en jeu entre S-E1 ($M = 43714$, $SD = 5915$) et S-E3, $t(13) = -0,736$, $p = 0,475$.

Il y a une amélioration (+8,41%) entre S-E3 et S-E1 sans différence statistiquement significative mais une diminution entre S-E3 et S-E2 (-12,16%) avec une différence statistiquement significative pour le groupe A (HMD-S3D classique). Il y a une amélioration (+11,94%) entre S-E3 et S-E1 sans différence statistiquement significative mais une diminution entre S-E3 et S-E2 (-0,25%) avec une différence statistiquement significative pour le groupe B (HMD-S3D-1c). Il y a une amélioration (+4,14%) entre S-E3 et S-E1 avec une différence statistiquement significative mais une dégradation entre S-E3 et S-E2 (-14,94%) sans différence statistiquement significative pour le groupe C (HMD-S3D-3c). Voir Figure 81.

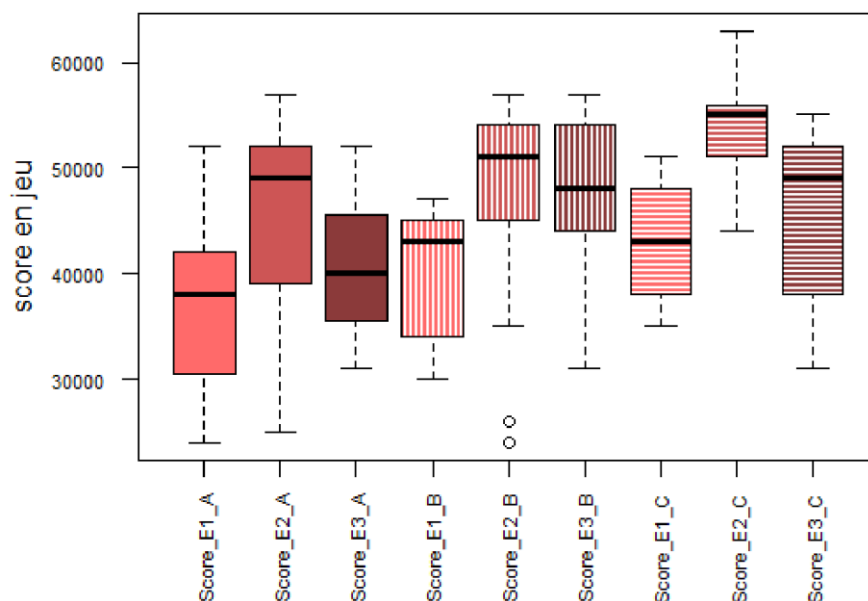


Figure 81 : Exp2, boîtes à moustache différence Scores en jeu chacun des 3 essais (rétention) dans chaque groupe

4.3.2.2.1.2 Différence Scores entre groupes ($\Delta S-E3-E1$ & $\Delta S-E3-E2$)

Afin de tester la différence entre les groupes, nous avons soustrait les scores S-E3 et S-E2. Cela donne un $\Delta S-E3-E2$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta S-E3-E2$. Tous suivent une distribution normale. Puis, nous avons soustrait les scores S-E3 et S-E1. Cela donne $\Delta S-E3-E1$. Le Shapiro-Wilk test a été utilisé afin de tester la distribution de chaque $\Delta S-E3-E1$. Tous ne suivent pas une distribution normale.

Les données sont indépendantes. Un one way ANOVA entre sujets est réalisé. L'analyse de la variance montre que l'effet de l'imagerie (S3D classique vs S3D-1c vs S3D-3c) sur l'évolution du score en jeu entre S-E2 et S-E3 n'est pas significative [$F(2) = 29,2, p = 0,09$]. Un Kruskal-Wallis test indique qu'il n'y a pas de différence significative de $\Delta S-E3-E1$ entre les groupes ($H(3,47) = 2, p = 0,176$), avec un rang moyen de 27,8 pour le groupe A, 29 pour le groupe B et 21,375 pour le groupe C. H_{exp24} ne peut pas être soutenu sur la base de la différence de $\Delta S-E3-E2$ entre les groupes.

4.3.2.2.2 Temps de réponse rétention

4.3.2.2.2.1 Différence Temps de réponse (TdR) E3-E1 et E3-E2 dans chaque groupe

Le test de Shapiro-Wilk est réalisé pour tester la distribution de chaque groupe. Les données TdR-E2 du groupe B et C ne suivent pas une distribution normale, toutes les autres TdR-E2 du groupe A et chaque données TdR-E1 et TdR-E3 suivent une distribution normale. Les données sont en minutes. **Nous utilisons des tests paramétriques et non paramétriques afin de tester la différence de TdR entre chaque essai au sein de chaque groupe.**

Les données sont appariées. Plus le temps est bas, plus l'apprentissage est élevé. Nous comparerons les temps entre le premier essai (TdR-E1) et le troisième essai (TdR-E3) puis entre le second essai (TdR-E2) et le troisième essai (TdR-E3) :

- Pour le groupe A, un t-test t est réalisé. Il y a une différence significative du temps de réponse des sujets entre TdR-E2 ($M = 7,73, SD = 1,18$) et TdR-E3 ($M = 6,86, SD = 1,41$), $t(18) = 2,53, p = 0,02$. Un t-test t est réalisé : il y a une différence significative du temps de réponse des sujets entre TdR-E1 ($M = 10,7, SD = 2,03$) et TdR-E3, $t(18) = 7,45, p = < 0,001$.
- Pour le groupe B, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E3, $MD = -0,31$, n'est pas statistiquement différente de celle de la médiane des rangs TdR-E2 : $Z = -0,72, p = 0,49$. Un t-test t est réalisé : il y a une différence significative du temps de réponse des sujets entre TdR-E1 ($M = 10,4, SD = 1,79$) et TdR-E3 ($M = 7,32, SD = 1,65$), $t(15) = 4,68, p = < 0,001$.
- Pour le groupe C, un Wilcoxon Signed-Ranks Test indique que la médiane des rangs du temps de réponse TdR-E3, $MD = -2,45$, est statistiquement différente de celle de la médiane des rangs TdR-E2 : $Z = -0,72, p = 0,049$. Un t-test t est réalisé : il y a une différence significative du temps de réponse des sujets entre TdR-E1 ($M = 12,3, SD = 1,64$) et TdR-E3 ($M = 7,04, SD = 1,68$), $t(13) = 10,01, p = < 0,001$. Voir Figure 82.

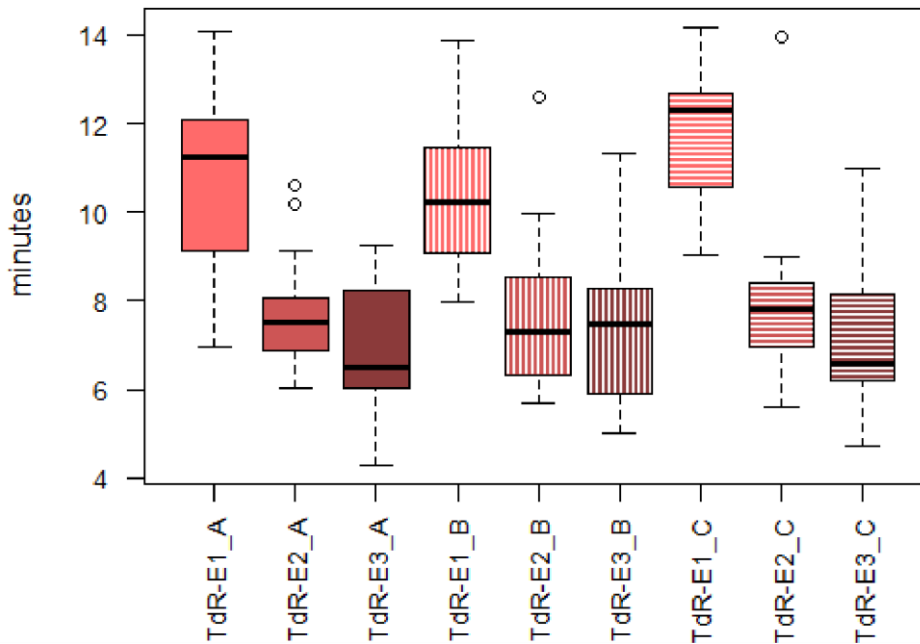


Figure 82 : Exp2, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre les 3 essais dans chaque groupe

Testant la différence de temps de réponse entre TdR-E2 et TdR-E3 (un mois plus tard), les groupe A (S3D classique), en moyenne 0,87 minutes, et C (S3D-3c), en moyenne 0,99 minutes, montrent une différence statistiquement significative. Les sujets du groupe B (S3D-1c), en moyenne 0,37 minutes, mettent moins de temps à répondre en TdR-E3 qu'en TdR-E2. Tous les groupes continuent à s'améliorer 1 mois plus tard sur le temps de réponse. Cependant, le groupe B ne s'améliore pas avec une différence significative entre second et troisième essai. $H_{\text{exp}24}$ ne peut pas être soutenu sur la base de cette variable car les groupes avec la stéréoscopie cyclique continue de s'améliorer mais moins bien que la S3D classique.

4.3.2.2.2.2 Différence Temps de réponse entre groupes ($\Delta TdR-E3-E1$ & $\Delta TdR-E3-E2$)

Afin de tester les données entre groupes, nous avons soustrait les temps TdRE3 et TdRE2. Cela donne un $\Delta TdR-E3-E2$. Les résultats sont testés avec le test de Shapiro-Wilk : tous suivent une distribution normale. Puis, nous avons soustrait les temps de réponse TdR-E3 et TdR-E1. Cela donne un $\Delta TdR-E3-E1$. Les résultats sont testés avec le test de Shapiro-Wilk : tous les groupes suivent une distribution normale.

Différence Temps de réponse entre groupe troisième et second essais ($\Delta TdR-E3-E2$) : un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de variance montre que l'effet de l'imagerie (S3D classique ou S3D-1c ou S3D-3c) sur les temps de réponse $\Delta TdR-E3-E2$ n'est pas significatif [$F(2) = 28,3$, $p = 0,57$]. Les tendances indiquent que le groupe A est celui qui s'améliore le plus, suivi par le groupe C puis le groupe B. $H_{\text{exp}24}$ ne peut pas être soutenu sur la base de la différence de $\Delta TdR-E3-E2$ entre les groupes.

Différence Temps de réponse entre groupe troisième et premier essais ($\Delta TdR-E3-E1$) : un one way ANOVA entre sujets est réalisé. Une analyse de variance montre que l'effet de l'imagerie (S3D classique ou S3D-1c ou S3D-3c) sur les temps de réponse $\Delta TdR-E3-E1$ n'est pas significatif [$F(2) = 20,9$, $p = 0,139$]. Les tendances indiquent que le groupe C est celui qui s'améliore

le plus, suivi par le groupe A puis le groupe B. H_{exp24} ne peut pas être soutenu sur la base de la différence de $\Delta TdR-E3-E2$ entre les groupes.

4.3.2.2.3 Synthèse rétention apprentissage

La courbe d'apprentissage des groupes avec l'imagerie S3D cyclique est moins bonne que celle de la S3D classique. Tous les groupes répondent plus vite lors du troisième essai (1 mois plus tard) comparé au second essai. Cependant, le groupe B ne s'améliore pas avec une différence significative entre second et troisième essai alors que le groupe A et C oui. La stéréoscopie cyclique affichée chaque minute a donc un impact négatif sur la courbe d'apprentissage des sujets. Sur la base de ces résultats, H_{exp24} : les courbes d'apprentissage sont plus élevées avec la S3D cyclique comparée à la S3D classique dans un SG via VR-HMD ne peut pas être soutenue.

4.3.2.2.3 Synthèse des résultats d'apprentissage

H_{exp23} : l'apprentissage s'améliore entre le premier (E1) et le deuxième essai (E2) avec la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD, peut être soutenue. H_{exp24} : les courbes d'apprentissage sont plus élevées avec la S3D cyclique comparée à la S3D classique dans un SG via VR-HMD, ne peut pas être soutenue.

4.3.2.3 Qualité d'expérience

Tous les questionnaires ont été complétés après les deux essais (après les 30 minutes) et les mesures optométriques post-exposition.

4.3.2.3.1 Présence

Les 10 items de la Multimodal Presence Scale de Makransky *et al.* sont combinés pour tester la présence dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le niveau de présence rapporté est élevé. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 4,26 non significatif ($p = 0,12$). Malgré le résultat du test de Friedman, un test post-hoc Pairwise Durbin-Cornover est réalisé. Il indique :

- une différence statistiquement significative entre le groupe A ($M = 3,40$, $SD = 0,91$) et le groupe B ($M = 3,07$, $SD = 1,23$), $p = 0,042$,
- aucune différence statistiquement significative entre le groupe A et C ($M = 3,24$, $SD = 1,06$), $p = 0,48$,
- aucune différence statistiquement significative entre le groupe B et C, $p = 0,18$.

Dans l'ensemble, le Présence globale a été rapportée comme moyenne ou légèrement élevée par les sujets, avec des médianes allant de 3 (groupe B) à 4 (groupes A et C). Le groupe B a une présence plus faible que le groupe A, ce qui indique un impact négatif de la stéréoscopie cyclique avec des cycles d'une minute sur la qualité d'expérience (QoE). Voir Figure 83.

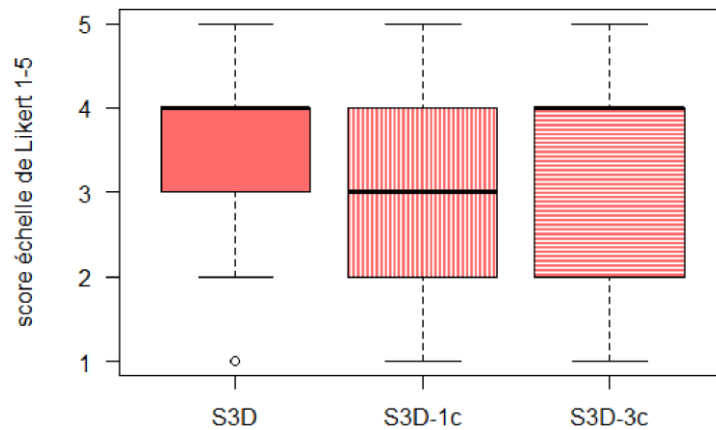


Figure 83 : Exp2, boîtes à moustache différence de Présence global entre groupes

4.3.2.3.2 Flow

Les 9 items de la Flow Short Scale de Rheinberg, Vollmeyer et Engeser ont été combinés pour tester le Flow dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le niveau de flow rapporté est élevé. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 18,90, significatif ($p = <0,001$). Un test post-hoc Pairwise Durbin-Cornover est réalisé et indique :

- une différence statistiquement significative de Flow entre le groupe A ($M = 3,63$, $SD = 0,87$) et le groupe B ($M = 4,00$, $SD = 1,23$), $p = <0,001$,
- une différence statistiquement significative de Flow entre le groupe A et C ($M = 3,83$, $SD = 0,85$), $p = 0,012$,
- aucune différence significative de Flow entre le groupe B et C, $p = 0,056$.

Dans l'ensemble, le Flow global a été rapporté comme étant légèrement élevé par les sujets, avec des médianes à 4 (pour tous les groupes). Le groupe A a signalé un Flow inférieur aux groupes C et B, ce qui indique un impact positif de la stéréoscopie cyclique avec des cycles de 1 minute et des cycles de 3 minutes sur la qualité d'expérience (QoE). Voir Figure 84.

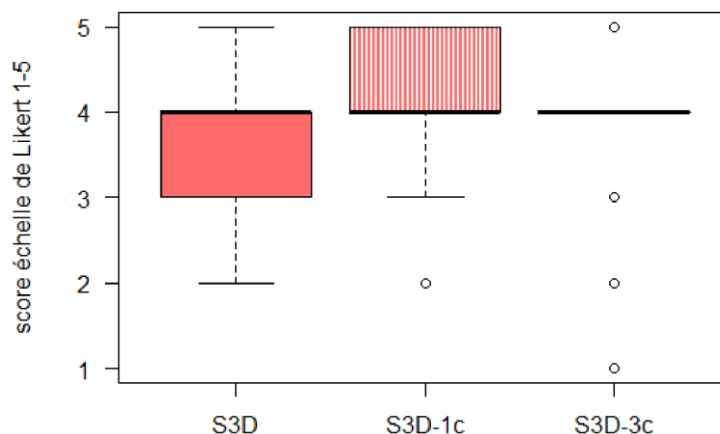


Figure 84 : Exp2, boîtes à moustache différence de Flow global entre groupes

4.3.2.3.3 Inconfort Visuel

Les 11 items du questionnaire de Zeri et Livi sont combinés pour tester le confort visuel dans son ensemble. Plus le score est élevé, plus le nombre de sujets signalant un inconfort visuel est

important. Un test de Friedman non paramétrique des différences entre les mesures répétées est réalisé. Il indique une valeur Chi-deux de 11,70, significatif ($p = 0,003$). Un test post-hoc Pairwise Durbin-Cornover est réalisé. Il indique :

- une différence significative de confort visuel entre le groupe A ($M = 1,80, SD = 0,93$) et le groupe B ($M = 1,89, SD = 1,12$), $p = 0,001$,
- aucune différence significative de confort visuel entre le groupe A et le groupe C ($M = 1,89, SD = 1,12$), $p = 0,54$,
- une différence significative de confort visuel entre le groupe B et le groupe C, $p = 0,008$.

Le groupe B rapporte un inconfort visuel moins important que le groupe A et le groupe C. Le groupe C a signalé un inconfort visuel inférieur mais pas statistiquement différent du groupe A. Dans l'ensemble, l'inconfort visuel global a été rapporté comme faible avec des médianes entre 1 et 2 sur l'échelle de Likert. Cela indique un effet positif de la stéréoscopie cyclique sur la qualité d'expérience (QoE). Voir Figure 85.

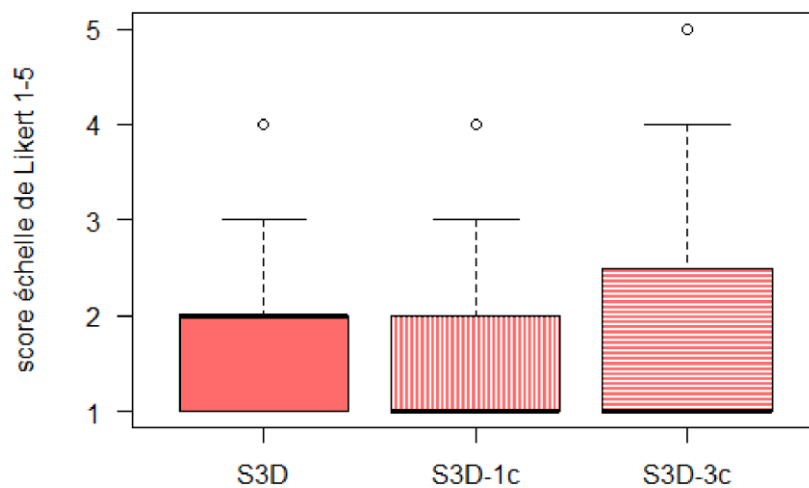


Figure 85 : Exp2, boîtes à moustache différence d'Inconfort visuel global entre groupes

4.3.2.3.4 Synthèse des résultats pour la qualité d'expérience

L'inconfort visuel et le Flow vont dans le sens de notre hypothèse selon laquelle la qualité de l'expérience est plus élevée avec la S3D cyclique que S3D classique dans un SG via VR-HMD. Pourtant, la Présence n'est pas conforme aux mesures de fatigue visuelle et aux courbes d'apprentissage. L'hypothèse H_{exp25} : la qualité d'expérience est différente entre la S3D cyclique et la S3D classique dans un SG via VR-HMD, est soutenue sur la base de l'inconfort visuel et le Flow avec un effet positif de la stéréoscopie cyclique sur la qualité d'expérience (QoE).

4.3.2.4 Corrélations entre variables

La plupart des mesures suivent une distribution non normale. Nous utilisons le rho de Spearman afin de tester la dépendance statistique entre les variables. Nous nous sommes concentrés à tester l'évolution de la fatigue visuelle en lien avec le temps de réponse (TdR) additionné du premier (E1) et second (E2) essai.

Lorsque nous avons testé l'addition du temps de réponse des deux premiers essais (TdR-E1 + TdR-E2) en X à l'évolution du point le plus proche d'accommodation (ΔPPA) de tous les

groupes additionnés ensemble en Y : une corrélation est identifiée. Rangs X Moyenne : 30, Standard Dev : 17,18 ; Rangs Y Moyenne : 30 ; Standard Dev : 17.16, Combiné : Covariance = $-5331 / 58 = -91,91$; $R = -91.91 / (17.18 * 17.16) = -0,312$, **p (2-tailed) = 0.016**. Il y a donc covariance du temps de réponse cumulé et l'évolution du PPA.

Aucun autre test de covariance entre l'addition du temps de réponse des deux premiers essais (TdR-E1 + TdR-E2) et les évolutions des variables optométriques ΔFA , ΔAS , ΔAV sont statistiquement significatives.

Il y a donc une relation entre le temps de réponse et l'évolution du PPA. **Plus le temps de réponse est long, plus le PPA est bas.**

4.3.3 Résultats Exp2

4.3.3.1 Fatigue visuelle et Stéréoscopie Cyclique

Notre hypothèse était que les variables optométriques différaient entre les mesures pre- et post-l'exposition avec l'imagerie S3D cyclique dans un SG via VR-HMD (H_{exp21}). Étant donné que le Punctum Proximum of Accommodation (PPA) et l'acuité visuelle (AV) sont statistiquement différents entre la pre-exposition et la post-exposition, l'hypothèse peut être soutenue. Cependant, l'acuité stéréoscopique (AS) et la facilité d'accommodation (FA) ne différaient pas statistiquement. L'effet global de la S3D cyclique semble négatif par rapport à la fatigue visuelle comme pour le S3D classique. Or, le but était d'abaisser le stress visuel via la S3D cyclique. Cela n'a donc pas fonctionné.

La seconde hypothèse était que la S3D classique entraînait une fatigue visuelle plus élevée que la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD (H_{exp22a}). Dans cette prédiction, le retour à l'imagerie bi-oculaire détendrait la vergence et atténuerait le conflit avec l'accommodation. Pour les variables optométriques suivantes, la S3D cyclique avait tendance à être plus fatigante : Punctum Proximum of Accommodation (PPA), Facilité d'accommodation (FA). Seule l'acuité stéréoscopique (AS) a montré une tendance contraire. L'acuité visuelle (AS) a montré une différence statistique entre le groupe B (stéréoscopie cyclique toutes les 1 minutes) et le groupe A (stéréoscopie classique) : la stéréoscopie cyclique toutes les 1 minutes est plus fatigante que la stéréoscopie classique. La stéréoscopie cyclique toutes les 3 minutes a tendance à être plus fatigante que la stéréoscopie classique bien qu'aucune différence statistique n'ait été constatée. Par conséquent, contrairement à notre hypothèse, la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD entraîne une fatigue visuelle plus élevée que le S3D classique. H_{exp22b} prédisant une différence significative entre les deux conditions de stéréoscopie cyclique (groupe B et C) ne peut pas être soutenue.

4.3.3.2 Efficacité d'apprentissage

Notre hypothèse était que l'apprentissage s'améliorerait entre le premier et le deuxième essai avec la S3D cyclique dans un SG via VR-HMD (H_{exp23}). Cette hypothèse peut être soutenue car il existe des différences statistiques entre E1 et E2 pour les deux conditions B et C. À notre connaissance aucune étude précédente ne compare l'apprentissage avec l'affichage de stéréoscopie cyclique.

Notre hypothèse était que les courbes d'apprentissage sont plus élevées avec la S3D cyclique que la S3D classique dans un SG via VR-HMD (H_{exp24}). Pour les courbes d'apprentissage à court terme (performance), les scores en jeu ont tendance à être plus élevés avec la condition de stéréoscopie classique plutôt que celle avec la stéréoscopie cyclique. Le groupe de cycles d'une minute est le moins performant. Cependant, le temps de réponse a une meilleure évolution avec la stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes par rapport à la stéréoscopie classique. De nouveau, la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute est la moins efficace. Il n'y a pas de différence statistique entre les groupes.

Pour les courbes d'apprentissage à long terme (rétention), les scores en jeu ont tendance à ne pas diminuer autant pour le groupe exposé à la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute comparé au groupe de stéréoscopie classique et le groupe de stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes. Cependant, l'évolution du temps de réponse tend à être meilleure pour la stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes que pour celle en stéréoscopie classique et la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute.

Aucun des tests statistiques n'a montré de différence entre les groupes dans les courbes d'apprentissage à court terme (performance) ou d'apprentissage à long terme (rétention). Par conséquent, conformément à notre hypothèse (H_{exp23}), l'apprentissage à court terme s'améliore en stéréoscopie cyclique. Mais contrairement à notre autre hypothèse (H_{exp24}), les courbes d'apprentissage ne sont pas plus élevées avec la S3D cyclique qu'avec S3D classique dans un SG via VR-HMD.

4.3.3.3 Qualité d'expérience

Notre hypothèse était que la qualité d'expérience est plus élevée avec la S3D cyclique que la S3D classique dans un SG via VR-HMD (H_{exp25}).

Inconfort visuel : la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute (groupe B) a rapporté un inconfort visuel plus bas que le groupe avec stéréoscopie classique (groupe A) et que le groupe avec stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes (groupe C). Le groupe avec une stéréoscopie classique est celui qui a signalé le plus grand inconfort visuel. Il existe une différence statistique entre le groupe B et le groupe A. Ces résultats sont surprenants, car les sujets du groupe B présentaient le plus de dégradation par rapport à leurs variables optométriques, mais signalent un confort supérieur. Bien que les deux méthodes ne mesurent pas la même chose, elles sont supposées se comporter en corrélation (Zeri & Livi, 2015). Un tel phénomène a également été documenté dans l'étude de Guo *et al.* lorsque leurs sujets reviennent dans le monde réel pendant les pauses (J. Guo *et al.*, 2019). Étant donné que nos sujets portaient constamment le HMD mais ressentaient une gêne après l'exposition, ce phénomène pourrait également s'appliquer à notre étude.

Présence : la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute (groupe B) a rapporté une présence plus faible que celle du groupe avec stéréoscopie classique (groupe A), avec une différence statistiquement significative. La stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes.

Flow : le groupe de stéréoscopie classique (groupe A) a signalé un Flow inférieur à celui du groupe avec stéréoscopie cyclique affichée chaque 3 minutes (groupe C) et celui du groupe

avec stéréoscopie cyclique affichée chaque 1 minute (groupe B) indiquant un impact positif de la stéréoscopie cyclique. Le relâchement la vergence pourrait aider les sujets à mieux se concentrer sur le contenu sans faire face aux effets négatifs de l'affichage stéréoscopique (par exemple, une vue double). Ces résultats ne sont pas discutables sur la base de précédentes études à notre connaissance.

L'inconfort visuel et le flow vont dans le sens de notre hypothèse selon laquelle la qualité d'expérience est plus élevée avec la S3D cyclique que S3D classique dans un SG via VR-HMD. Pourtant, la Présence n'est pas en ligne avec les mesures de fatigue visuelle et de courbes d'apprentissage.

4.3.4 Conclusion Exp2

Cette étude visait à évaluer les effets de l'imagerie stéréoscopie cyclique avec un Samsung Gear VR (équipé d'un Galaxy S6) lors de l'apprentissage du comportement attendu lors d'un entretien d'embauche. Nos résultats montrent que l'impact d'un tel traitement sur l'image est presque nul ou négatif sur la fatigue visuelle en fonction de la variable d'acuité visuelle lorsque l'environnement virtuel ne comporte pas de tâches de discrimination de la profondeur et une faible disparité. Cela va dans le sens de Cai *et al.* indiquant que le processus d'activation de la stéréopsie est plus fatiguant que son processus de maintien (T. Cai *et al.*, 2017). Des études antérieures montrant des résultats encourageants avec la stéréoscopie intermittente ne l'activaient qu'au début ou à la fin d'une tâche (Bouaniche & Leroy, 2016 ; S. Matsuura, 2013). Nous avons choisi de l'activer plusieurs fois au cours de l'exposition (de manière cyclique). Pour les environnements virtuels avec des tâches visuelles plus complexes que la nôtre, la stéréoscopie pourrait être plus nécessaire à la réalisation de tâches et donc être activée lorsque des tâches visuo-spatiales doivent être accomplies. Les courbes d'apprentissage ne montrent aucune différence statistique entre les groupes, mais l'apprentissage à court terme a été amélioré dans les groupes avec stéréoscopie cyclique. Pourtant, la stéréoscopie cyclique n'a pas conduit à une meilleure efficacité d'apprentissage que la stéréoscopie classique. La qualité d'expérience était meilleure avec la stéréoscopie cyclique basée sur le confort visuel et le flux, mais inférieure à la stéréoscopie classique basée sur la présence. La qualité d'expérience semble plus élevée avec la S3D cyclique que S3D classique dans un SG via VR-HMD.

La stéréoscopie cyclique doit être testée avec d'autres contenus : des tâches visuo-spatiales, avec des mouvements dans l'environnement virtuel et d'autres HMD (qualité supérieure). Cela permettrait d'évaluer la fatigue visuelle dans différentes conditions afin de trouver d'autres stratégies de réduction. Des matériaux tels que l'oculomètre devraient être envisagés pour mesurer la fatigue visuelle car de nouveaux modèles d'HMDs l'implémentent.

L'expérience 1 et 2 montrent des tendances d'apprentissage moins efficace lorsque les conditions testées conduisent à une fatigue visuelle. Nos expériences semblent aller dans le sens d'un lien entre fatigue visuelle et charge cognitive. Nous traitons ce lien dans la prochaine section.

4.4 LIENS ENTRE FATIGUE VISUELLE ET CHARGE COGNITIVE

4.4.1 Contexte

Au début de cette thèse, une hypothèse plancher était posée : la fatigue visuelle influence négativement l'apprentissage en SG-VR. Le matériel à notre disposition, les apports empiriques d'autres équipes ne nous permettaient pas de vérifier cette hypothèse. En analysant les résultats de nos expériences et en travaillant au protocole d'une expérience 3, cette hypothèse plancher s'est présentée de nouveau. D'autres preuves acquises entre 2017 et 2019 par des équipes différentes (en France, en Corée du Sud, en Angleterre et en Allemagne) et des indices, surtout dans notre expérience 2 autorisaient cette hypothèse à rester ouverte. Sur la base de précédents travaux, globalement en accord avec les résultats des 2 expériences rapportées dans cette thèse, nous proposons une démonstration afin d'expliquer comment une fatigue visuelle peut impacter négativement les capacités cognitives et inversement. Cette partie correspond à l'apport identifié lors de l'état de l'art [A5] Questionner le lien entre fatigue visuelle et charge cognitive pour en tirer les problématiques sur l'apprentissage avec des HMDs. Cette démonstration du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive a fait l'objet de 2 communications scientifiques : (Souchet, Philippe, & Leroy, 2019a ; 2020a)

4.4.2 Anatomie et traitement (où ?)

Dans le travail pour identifier des biomarqueurs de la fatigue visuelle via oculomètre, nous avons constaté que les mêmes variables sont mesurées pour la fatigue visuelle, la charge cognitive et l'émotion. Les clignements des yeux et la taille des pupilles sont des marqueurs de chaque état. Comment les mêmes variables, dans des contextes identiques ou des paradigmes expérimentaux hétérogènes, peuvent mesurer des états psychophysiques/physiologiques différents ?

Des réponses peuvent être trouvées au niveau de l'anatomie du cerveau : voir Figure 86. Daniel et Kapoula rapportent que certains traitements (de la disparité, de la vergence et le signal d'accommodation) sont associés à des activités dans les mêmes zones du cerveau : cortex visuel, pariétal et le lobe frontal ainsi que le cerebellum (F. Daniel & Kapoula, 2019). Ces zones sont donc liées à l'état binoculaire, aux mouvements saccadiques et la charge cognitive. En accord avec ces découvertes, selon la revue de Terzić et Hansard, le traitement visuel est lié à une augmentation de l'activité dans les lobes pariétal et occipital (Terzić & Hansard, 2017).

Selon les mêmes auteurs, la fatigue est associée à une réduction de l'activité dans le cortex visuel en général concomitante à une augmentation de l'activité dans le cortex préfrontal et les zones V3, V4 et MT. Ces zones sont associées au contrôle oculaire (muscles). Il apparaît également que l'exposition à la stéréoscopie affecte les lobes pariétal et temporal inférieur ainsi que le cortex occipital (Yue *et al.*, 2018). Ces effets dépendent de la durée d'exposition aux contenus. Notons que les neurones impliqués dans le traitement des hautes disparités sont localisés dans la zone pariétale et le lobe temporal inférieur tandis que le traitement de basses disparités est localisé dans le cortex occipital (Yue *et al.*, 2018). Les variables mesurées, acquises via oculomètre, sont les mêmes pour la fatigue visuelle et la charge cognitive car les mêmes

zones du cerveau sont activées par les deux états. Il y a donc un « lien anatomique » entre charge cognitive et fatigue visuelle.

Il apparaît donc que plusieurs zones du cerveau sont impliquées simultanément dans le traitement des informations relatives à la fatigue visuelle et la charge cognitive.

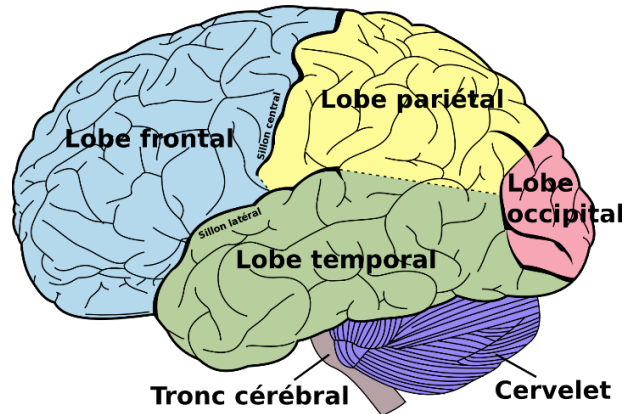


Figure 86 : Divisions corticales du cerveau humain¹⁰

Cette identification des phénomènes de charge cognitive et de fatigue visuelle dans des zones similaires invitent à se concentrer sur les mécanismes cognitifs de la fatigue visuelle. Les informations issues du système visuel sont en partie traitées par le lobe pariétal notamment pour réguler l'attention et appréhender la perception de l'espace. Le cortex préfrontal gère la mémoire de travail. Le traitement d'informations comportant des erreurs, des conflits sensori-moteurs (conflit accommodation-vergence), implique une charge supplémentaire pour le cerveau humain. Nous insistons sur cette colocalisation des phénomènes de charge cognitive et de fatigue visuelle afin d'installer la dimension cognitive de la fatigue visuelle encore faiblement identifiée et traitée dans la littérature. Nous nous focalisons sur la colocalisation de charge cognitive et de fatigue visuelle (flux visuel) car ce sont nos problématiques précises mais ces observations pourraient potentiellement s'étendre aux autres phénomènes de fatigue chez l'humain. Or, nous avons documenté que d'autres effets secondaires sont identifiables avec la VR (voir section 2.3.2).

4.4.3 Traitement et comportement du système visuel (comment ?)

Nous avons identifié dans la littérature que la fatigue visuelle et la charge cognitive sont associées à des variations d'activités dans des zones similaires du cerveau. Des preuves supplémentaires soutiennent le lien entre le comportement du système visuel en cas de fatigue visuelle et/ou de charge cognitive. Les variations des métriques analysées via oculomètre pour mesurer les deux phénomènes (la taille de la pupille et le clignement des yeux) sont similaires (voir sections 2.1.4.2.5 & 2.3.4.2). La fatigue visuelle et la charge cognitive peuvent être évalués via des paramètres physiologiques tels que la sécrétion des neurotransmetteurs. Par exemple, la littérature se concentrant sur les performances de pilotes (d'avion) et les facteurs humains

¹⁰ © Creative Commons: par Mysid, traduit par JDifool — Vectorized in CorelDraw by Mysid, based on the online edition of Gray's Anatomy. |Date=November 28, 2006, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4424995>

mesurés via oculomètre démontrent l'utilisation de marqueurs identiques pour mesurer ces deux états (Peißl, Wickens, & Baruah, 2018).

La taille de la pupille est liée à la charge cognitive car les mêmes régions corticales sont concernées, particulièrement en lien avec la difficulté d'une tâche et l'effort nécessaire pour l'accomplir (Eckstein, Guerra-Carrillo, Singley, & Bunge, 2017). La taille de la pupille est aussi liée à l'activité du *locus coeruleus* (impliqué dans la peur, l'anxiété et le sommeil) et les sécrétions de noradrénaline (neurotransmetteur associé avec l'attention sélective, la vigilance et l'apprentissage) (Hoffing & Seitz, 2016). Selon Eckstein *et al.*, les changements de la charge cognitive induits par une tâche causent des changements dans la taille de la pupille pouvant la faire varier de 0,5 mm (Eckstein *et al.*, 2017).

Les réseaux neuronaux et les zones du cerveau impliqués dans le clignement des yeux sont mal identifiés. Cependant, leur variation apparaît comme un biomarqueur viable des activités de la dopamine centrale (Eckstein *et al.*, 2017) et donc des mécanismes liés à la motivation (Wise, 2004). Le clignement des yeux est lié au contrôle cognitif, l'apprentissage (attention, mémoire), la récompense et la prise de décision. Paprocki et Lenskiy ont trouvé des résultats similaires en travaillant sur la performance cognitive (Paprocki & Lenskiy, 2017): le clignement des yeux est une métrique viable pour la charge cognitive et mentale. De plus, les changements de contrôle cognitif et de charge cognitive sont concomitants avec des modifications des clignements des yeux (Rac-Lubashevsky, Slagter, & Kessler, 2017) et le niveau de dopamine (Jongkees & Colzato, 2016). Ces traitements cognitifs sont associés à des comportements des yeux similaires à la fatigue visuelle. Ces similarités des comportements des yeux, restituant des traitements cognitifs (taille de la pupille, clignements), révèle un lien entre fatigue visuelle et charge cognitive. Un tel lien a des implications théoriques sur la manière dont la fatigue visuelle est appréhendée d'une part et sur la manière dont la charge cognitive en HMD est appréhendée d'autre part.

4.4.4 Implications théoriques pour la Fatigue Visuelle et la Charge Cognitive

Comme annoncé par Park *et al.*, les liens entre fatigue visuelle et l'état cognitif implique que la fatigue visuelle peut être incluse dans la théorie de la charge cognitive (S. Park *et al.*, 2015). Parmi les trois types de charges cognitives décrites par Sweller, la charge extrinsèque, dépendante de comment l'information est présentée et acquise (Sweller, 2011), prédit des changements tels que le comportement des yeux.

Les conflits sensori-moteurs tels que la disjonction entre accommodation et vergence induisent une charge additionnelle sur la mémoire de travail (Baddeley, 2010). Une hypothèse peut expliquer ce mécanisme : des conflits répétés alimentent une surcharge cognitive. Les mécanismes de contrôle du comportement des yeux compensent cette surcharge en modifiant certaines stratégies : ex. augmenter le temps de fixation, augmenter les clignements et réduire la taille de la pupille. Chen et Epps testent cette possibilité de la charge liée à la perception (S. Chen & Epps, 2014). Cependant, leurs résultats ne permettent pas de généraliser les implications théoriques.

D'autre part, le lien entre charge cognitive et fatigue visuelle est expliqué dans les travaux sur les conflits en vision stéréoscopique : cela ajouterait une charge lors de conflits de perception.

Cai *et al.* indiquent que l'activation de la stéréopsie par des images stéréoscopiques provoque une fatigue visuelle (T. Cai *et al.*, 2017). Cela est appuyé par les résultats de notre Expérience 2 (Souchet, Philippe, Ober, Lévêque, & Leroy, 2019b). Chen *et al.* indiquent que le maintien d'une stéréopsie provoque de la fatigue (C. Chen *et al.*, 2017a). Indépendamment de ces positions, un lien entre le travail requis par le cerveau lors de stimuli visuels inhabituels semble nécessiter des ressources cognitives supplémentaires. Mun *et al.* indiquent que la fatigue visuelle avec la S3D est corrélée à la fatigue cognitive (Mun, Park, Park, & Whang, 2012). Iskander *et al.* déclarent que la fatigue visuelle est davantage liée à la fatigue mentale que musculaire (Iskander *et al.*, 2018). Cependant, le consensus scientifique concernant la fatigue visuelle se concentre sur les causes et conséquences sur le système oculo-moteur, peu ou pas sur les implications cognitives.

Nous voyons dans ces liens entre charge cognitive et fatigue visuelle une base pour questionner le paradigme d'étude de ce second phénomène chez l'humain. Ce changement de paradigme pour appréhender la fatigue visuelle à travers ses mécanismes cognitifs invite à repenser sa définition.

4.4.5 Vers une nouvelle définition de la Fatigue Visuelle

Comme le montre la littérature, la dimension cognitive de la fatigue visuelle semble pertinente même si davantage de contributions sont nécessaires pour confirmer ce lien. Ceci invite à inclure plus de facteurs que ceux proposés dans la définition de la fatigue visuelle de Lambooij *et al.* : « *diminution de la performance du système visuel résultant d'une contrainte ou d'un stress physiologique résultant d'un effort excessif* » (Lambooij *et al.*, 2009). Cette définition est souvent utilisée dans les dernières contributions scientifiques sur les conséquences de l'utilisation de l'imagerie stéréoscopique. Cependant, elle exclut une partie des comportements ou processus entraînant des symptômes de fatigue visuelle, tels que la sécheresse des yeux et la surcharge de mémoire de travail. Par conséquent, nous proposons une extension de la définition de Lambooij *et al.* : **Diminution de la performance du système visuel due à une contrainte physiologique ou à un stress résultant d'un effort excessif et / ou d'une saturation de la mémoire de travail.**

4.4.6 Implications pour l'apprentissage en SG-VR

L'hypothèse plancher de la thèse est un lien entre charge cognitive et fatigue visuelle. Nos expériences ne le vérifient pas directement. Or, un tel lien pourrait à la fois expliquer une chute des capacités cognitives, l'influence des instructions autant que les modes de présentation des contenus d'apprentissage sur la fatigue visuelle. Donc, des contenus impliquant une forte mobilisation de la mémoire de travail pourraient d'une part impacter négativement le système visuel humain et d'autre part augmenter la fatigue visuelle, l'effort de la mémoire de travail étant élevé. En somme, l'apprentissage avec un HMD affichant de la stéréoscopie, par le conflit accommodation-vergence, impliquerait un impact négatif sur les capacités cognitives. Donc possiblement un apprentissage moins efficace. L'inverse peut également être souligné. Une charge cognitive importante, comme on peut s'y attendre lors d'une tâche d'apprentissage, pourrait impacter la fatigue visuelle en l'augmentant. Donc cela pourrait augmenter les risques sur la psychologie et la santé humaine dans le cadre de l'apprentissage avec des HMDs.

4.4.7 Nos résultats au regard de ce lien fatigue visuelle – charge cognitive Notre première expérience (voir section 4.1) montre que la fatigue visuelle a tendance à avoir des impacts négatifs sur les performances d'apprentissage. Mais dans ce cas, elles sont faibles et n'empêchent pas la rétention. Notre seconde expérience (voir section 4.3) montre que l'apprentissage à court terme est presque similaire entre les groupes avec stéréoscopie cyclique et le groupe avec stéréoscopie classique. Or, la stéréoscopie cyclique s'est révélée plus fatigante visuellement que la classique. C'est pour la rétention (3^e essai un mois plus tard) qu'on constate que le groupe avec la condition présentant le plus de fatigue visuelle a moins bien performé que les autres. Donc, la puissance prédictive du lien entre charge cognitive et fatigue visuelle allant dans le sens d'une fatigue visuelle plus élevée covariante à une charge cognitive élevée et inversement ne se vérifie pas systématiquement dans nos expériences. Cependant, des tendances vont en ce sens. L'apprentissage apparaît négativement impacté concomitamment à une fatigue visuelle.

4.4.8 Conclusion : lien fatigue visuelle / charge cognitive

Les récentes avancées montrent que les traitements de la charge cognitive et de la fatigue visuelle se déroulent dans les mêmes zones du cerveau humain. Nous nous sommes ensuite concentrés à décrire le processus de traitement de la charge cognitive et de la fatigue visuelle en nous intéressant aux variations du système visuel humain comme révélateurs de ces traitements. Les récentes avancées montrent des stratégies de modification des comportements visuels (taille de la pupille, clignement des yeux) connexes entre fatigue visuelle et charge cognitive. Devant ces deux constats, nous proposons une nouvelle définition de la fatigue visuelle permettant d'inclure sa dimension cognitive (via la notion de charge de la mémoire de travail). Cette nouvelle définition permet également d'interroger le lien voire la covariance de la charge cognitive et de la fatigue visuelle. Enfin, nous discutons les implications que de tels liens pourraient avoir dans le cadre spécifique de l'apprentissage en réalité virtuelle. Les risques que nous identifions est l'ajout d'une charge supplémentaire pour la mémoire de travail avec le conflit accommodation-vergence et une fatigue visuelle plus importante lors de tâche impliquant des ressources cognitives élevées. Dans les deux cas, cela pourrait impliquer une efficacité d'apprentissage abaissée. Cependant, les résultats de nos expériences ne viennent pas systématiquement soutenir cette tendance : la fatigue visuelle est présente en HMD mais ne se traduit pas nécessairement par une mauvaise courbe d'apprentissage.

Nous venons de démontrer qu'il y a des preuves concordantes de liens entre fatigue visuelle et charge cognitive, nous invitant à revisiter la définition de fatigue visuelle pour y inclure une dimension cognitive. Cela constitue l'apport identifié [A5] (voir section 2.5) établi lors de l'état de l'art.

5 DISCUSSION

Notre état de l'art porte sur le SG, la VR, la combinaison SG-VR (voir section 2.1) puis le système visuel humain, comment ce dernier est stimulé en HMD notamment pour restituer la profondeur via la stéréoscopie (voir section 2.2), enfin nous traitons de l'effet secondaire de l'exposition à la VR qu'est la fatigue visuelle et les techniques pour la réduire (voir section 2.3). Cet état de l'art nous permet d'identifier 5 apports nécessaires afin de répondre aux questions de recherche posées (voir section 1.2) afin d'établir les bénéfices et risques de l'usage du dispositif SG-VR à des fins d'apprentissage. Afin d'élaborer ces apports, nous spécifions le matériel et les méthodes retenues : la revue de la littérature est conduite en listant les mots clés recherchés, les bases de données interrogées, les critères d'inclusion et d'exclusion (voir section 3.2) ; les 2 expériences permettent de mesurer l'apprentissage (via la performance et la rétention, voir section 3.3), la fatigue visuelle (via 6 tests optométriques, voir section 3.4) et la qualité d'expérience (via présence, flow et inconfort visuel, voir section 3.5) avec un SG-VR (*Mon entretien d'embauche*, voir section 3.7). Ensuite, nous restituons les résultats de la revue, des 2 expériences et d'une démonstration du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive afin de constituer les 5 apports nécessaires identifiés.

Afin d'établir les preuves à disposition pour un usage raisonné des SG, de la VR et de la S3D nous conduisons une revue de la littérature (voir section 4.1). Au total, cette revue présente 8 méta-analyses, 7 revues systématiques, 15 revues, 1 rapport scientifique et 53 articles expérimentaux. La revue indique que le SG, la VR, la combinaison SG-VR et la S3D sont globalement plus efficaces pour apprendre lorsque comparés à d'autres modalités (PC, Powerpoint, papier, instructions web) et d'autre affichages (bi-oculaire). Cependant, la nécessité d'apports expérimentaux de meilleure qualité (plus contrôlés notamment) sont pointés dans les précédentes vue d'ensemble sur ces problématiques. Notre propre revue pointe effectivement cette nécessité : par exemple de comparer un même SG déployé sur plusieurs dispositifs (PC versus VR) pour attester du meilleur avantage de la VR sur d'autres dispositifs. Notre revue montre que les apprentissages hors des sciences ou de procédures manquent. Enfin, la fatigue visuelle est rarement traitée dans le cadre de l'apprentissage : le risque et sa mesure sont quasiment absent des études avec HMDs. C'est la raison pour laquelle procédons à 2 expériences.

L'expérience 1 (voir section 4.2) montre que les HMDs de nouvelle génération causent une fatigue visuelle, celle-ci est plus élevée que devant un écran de PC. Cette fatigue visuelle en HMD a tendance à être plus élevée avec l'imagerie stéréoscopique comparée à l'imagerie bi-oculaire. Mais aucune différence statistiquement significative à cet effet dans un environnement virtuel avec une disparité faible, peu de mouvements et pas de tâches nécessitant la discrimination de la profondeur. La fatigue visuelle n'a pas négativement impacté l'apprentissage.

L'expérience 2 (voir section 4.3) nous indique qu'afficher cycliquement de la stéréoscopie (passer de bi-oculaire à binoculaire) fatigue plus qu'afficher de la stéréoscopie sans interruption. Plus la stéréopsie est activée via des stimuli conflictuels, plus la fatigue est élevée.

Ces deux expériences motivent à considérer la dimension de charge sur la mémoire de travail (cognition) dans la fatigue visuelle. Nous opérons à une démonstration du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive (voir section 4.4) sur la base de nos résultats expérimentaux et les preuves recueillies lors de l'état de l'art. Il apparaît que plus les erreurs (conflits sensori-moteurs) sont nombreuses et s'accumulent, plus le système visuel compense par des comportements associés à la fatigue visuelle. Cela lui permet de préserver la constance perceptuelle mais au prix d'une fatigue oculomotrice et possiblement mentale.

Ces résultats comportent des limites propres aux matériel et méthodes retenues ainsi qu'à la réalisation des apports identifiés. Nous présentons ces limites dans la section suivante.

5.1 LIMITES DES RESULTATS OBTENUS

Les limites doivent être considérées avec nos résultats actuels : 1) nous avons utilisé des mesures optométriques faciles à déployer, mais des outils plus précis, tels que l'eye tracking, pourraient conduire à des résultats plus puissants et significatifs, 2) l'évaluation de la qualité d'expérience a été faite à travers des questionnaires, 3) nous avons choisi d'utiliser un environnement virtuel avec une très faible disparité, presque pas d'objets en mouvement, les sujets étaient assis sur une chaise, ce qui les préserve d'autres conflits sensorimoteurs puissants (ex. notre environnement virtuel préserve lavection), 4) les tâches visuelles étaient très faciles, ce qui peut affecter les résultats (Zou, Liu, Guo, & Wang, 2015) comme indiqué par Zou *et al.*, et pourrait affecter l'état général des sujets (Yuan *et al.*, 2018), 5) les caractéristiques générales (qualité) des HMDs choisis (Samsung Gear VR) sont faibles comparés à d'autres appareils sur le marché (tels que HTC Vive ou Oculus Rift) ce qui peut influencer la collecte de données. Par exemple, la visualisation périphérique pourrait avoir une incidence sur les résultats, car le Samsung Gear VR a un champ de vision (FoV) de 90°. L'utilisation de tâches visuelles plus complexes et d'autres HMDs pourrait donner plus d'indications sur l'efficacité de la stéréoscopie cyclique. Ces points doivent être pris en compte afin de comprendre les résultats parfois contradictoires entre la qualité d'expérience et les métriques d'apprentissage et de fatigue visuelle dans notre étude. Nos choix de matériel et méthodes en plus d'un but scientifique se voulaient transposable à un contexte d'évaluation en entreprise. Dans une dynamique d'évaluation avec des groupes tests à la fois pour attester de l'efficacité des serious games mais également de mesurer les risques de chaque contenu (fatigue visuelle particulièrement). Nous reprenons ici nos résultats en détail pour en discuter les limites.

5.1.1 Conduite de la revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage

Les résultats de notre revue indique la supériorité d'efficacité d'apprentissage des SG, de la VR, de la combinaison SG-VR et la S3D sur d'autres modalités ou la 2D. Cependant les apprentissages procéduraux ou des sciences sont les plus testés. Ainsi, l'efficacité (et la supériorité comparée à d'autre modalités) d'apprentissage repose sur des preuves dont le champ nécessite d'être étendu. Par exemple, les apprentissages de codes sociaux ne sont quasiment pas traités. Notre revue a exclu les expériences réalisées avec des participants dits « non sains. » Une grande proportion des publications scientifiques sur le SG et la VR repose sur des populations dites non-saines : neuroatypique, en réhabilitation... Les publications, par la réémergence des HMDs sur le marché grand publique, augmentent et plus seront à disposition afin de mettre à

jour la revue de la littérature à laquelle nous avons opéré. Il est tout de même à noter que les preuves d'efficacité de ces dispositifs permettent un consensus léger car toutes les précédentes vues d'ensemble appellent à plus d'études expérimentales et à étendre le champ des tests ainsi qu'à augmenter la qualité des études. Les mêmes conclusions sont tirées de notre propre revue. Ainsi, les résultats de nos revues sont à considérer avec ces limites.

5.1.2 Mesurer la fatigue visuelle

Nous avons employé 6 mesures optométriques (dont une en moins lors de l'expérience 2) pour évaluer la fatigue visuelle. Le champ et la précision des mesures sont peut-être trop larges. Ainsi, avoir recours à des outils plus précis semble nécessaire pour une analyse plus fine du phénomène de fatigue visuelle même dans des conditions écologiques telles que l'apprentissage via Serious Game en VR. L'implémentation d'oculomètre dans de nouveaux modèles d'HMD, rend cette technique à considérer. Nous n'avons pas employé la mesure de l'amplitude de vergence via le test de Schober dans l'expérience 2 car les sujets peinaient à comprendre les instructions et le placement de la croix selon le cercle sur tablette était très imprécis rendant l'interprétation des résultats hasardeuse lors de l'expérience 1. Les 6 tests cliniques employés par nos soins sont souvent mobilisés dans la littérature (J.-S. Lee, 2019 ; W. Lin, 2016 ; Scheiman & Wick, 2014). Aussi, nous y avons eu recours pour des soucis de comparabilité des résultats. Les mesures que nous avons obtenues correspondaient aux standards prévus par ces tests. Des tests cliniques de ce type ont l'intérêt d'être simples à administrer. Pour une entreprise, cela permet une mise en œuvre simple et peu coûteuse. Cependant, l'aspect négatif de ces tests est qu'ils reposent sur des instructions aux participants. Celles-ci étaient parfois mal comprises. Aussi, il pouvait arriver que les instructions doivent être répétées.

Le Samsung Gear VR ne permet pas l'individualisation de la distance inter-pupillaire alors que cela est possible avec un HTC-Vive ou un Oculus Rift. Par conséquent, le réglage de Samsung Gear VR est moins efficace et pourrait influencer le stress oculomoteur. C'est particulièrement le cas pour le contenu stéréoscopique que nous avons adapté en fonction de la distance inter-pupillaire générale (65 mm). Nos résultats optométriques peuvent varier en fonction du réglage (distance de l'écran rapport aux yeux non le réglage de l'écart interpupillaire) opéré par les sujets eux-mêmes pour obtenir ce qu'ils considèrent comme une vision confortable. Mais les apprentissages n'étaient pas dépendant de la capacité du sujet à interagir avec des éléments de l'environnement ou la discrimination de la profondeur. Ainsi, nous pouvions nous concentrer sur les effets directs de l'appareil (PC ou HMD) et l'imagerie (bi-oculaire ou binoculaire).

5.1.3 Mesurer l'apprentissage

Nous avons employé l'évaluation de l'apprentissage via la performance (Soderstrom & Bjork, 2015) et la rétention (Bennett & Rebello, 2012). Les mesures, dites sommatives (Zolotaryova & Plokha, 2016), de Score en jeu et de Temps de Réponse étaient considérées (Caballero-Hernández *et al.*, 2017). Ce sont des marqueurs classiques d'efficacité à la tâche dans les paradigmes expérimentaux évaluant l'apprentissage en serious game (Bellotti *et al.*, 2013). L'avantage était d'avoir un système d'évaluation de l'apprentissage en jeu récupérable par les traces des participants. Nos résultats viennent donc enrichir les contributions expérimentales sur

l'apprentissage utilisant les traces obtenues en jeu qui, d'après la méta-analyse de Smith *et al.*, est la moins employées dans littérature (S. P. Smith *et al.*, 2015).

Cependant, ce système d'évaluation dépend, dans notre serious game, d'un ensemble de règles pédagogiques adaptées à des apprentissages impliquant un dialogue entre deux personnes. De plus, nous nous concentrons sur les dispositifs et l'imagerie plutôt que les instructions. Aussi, une évaluation en jeu n'est pas forcément comparable à d'autres modalités d'apprentissage (cours magistral avec Power Point, instructions dans un manuel, jeux de rôles et instructions orales) impliquant une évaluation avant et après exposition.

Il sera nécessaire de considérer le Transfert ainsi que les Comportements et la Cognition (voir section 2.1.4.2) pour évaluer plus en détail l'apprentissage. À ce titre également, l'oculomètre est à considérer pour mesurer les Comportements et la Cognition. C'est la raison pour laquelle nous avons présenté ce matériel et certaines des métriques à considérer dans l'état de l'art.

5.1.4 Mesurer la qualité d'expérience

La qualité d'expérience est le plus souvent mesurée à travers les questionnaires. Certaines limites de cette méthode sont depuis longtemps pointées dans la littérature (Freeman *et al.*, 1999). Présence et Flow pour les serious games et la réalité virtuelle sont des indications de qualité d'expérience (Hupont *et al.*, 2015). Notre démarche générale était d'employer des questionnaires synthétisant la variété des items existants et dont la robustesse a été testée statistiquement avec de larges populations. Concernant la Présence, les questionnaires sont nombreux (Cummings & Bailenson, 2015). Nous avons choisi le « Multimodal Presence Scale » de Makransky *et al.* composé de 15 items, traduits en français par nos soins (Makransky *et al.*, 2017). Nos résultats montrent que les variations de ce questionnaire global sont parfois incohérentes avec des mesures objectives d'autres variables : oculomotrices (fatigue visuelle) et cognitives (efficacité d'apprentissage). Nous avons choisi la « Flow Short Scale » de Rheinberg, Vollmeyer et Engeser composée de 9 items, traduits en français par nos soins (Engeser & Rheinberg, 2008). Dans nos expériences, le Flow était légèrement positif (médiane à 4 sur 5), le serious game a donc été engageant avec des variations assez faibles selon l'imagerie et des variations similaires selon le dispositif (PC ou HMD). Ses variations suivaient plus logiquement les tendances ou résultats des mesures objectives opérées pour l'apprentissage ou la fatigue visuelle que pour la Présence. Concernant l'inconfort visuel, nous avons employé le questionnaire de Zeri et Livi composé de 11 items, traduit par nos soins en français (Zeri & Livi, 2015). L'inconfort visuel a été évalué comme assez bas (médianes de 1 à 2 sur 5). La variation de ce marqueur de la qualité d'expérience ne suivait pas systématiquement les mesures objectives opérées. Cela peut s'expliquer par le fait que le questionnaire a initialement été développé pour le cinéma 3D et non les HMDs.

Nous n'avons pas testé la validité des questionnaires traduits en français avant de les administrer. Peut-être qu'un biais à la traduction a influencé la capacité des participants à restituer leurs états de présence, flow et inconfort visuel. Nous pensons que cela a eu une influence mineure sur les variations parfois incohérentes observées à travers nos expériences. En revanche, l'emploi de mots techniques ou de notions pouvant être inconnues par les participants est plus à considérer selon nous. Contrairement à de précédentes études, nos participants n'étaient pas des

étudiants experts en jeu vidéo ou serious game connaissant les concepts de ces champs. Cela questionne la validité de tels tests lorsque opérés et testés auprès de populations non naïves. Pour la Présence en particulier, mais nous pensons que la critique peut s'étendre au Flow et l'Inconfort visuel, Slater montre comment les questionnaires sont limités dans leur capacité à recueillir objectivement l'état des participants (Slater, 2004). À ce titre, des travaux sont réalisés pour que la qualité d'expérience soit mesurée « objectivement » : rythme cardiaque, activité cérébrale, sudation, équilibre... Employer des questionnaires reste un moyen simple d'évaluer le rapport des utilisateurs à un dispositif, une imagerie et cela reste nécessaire en l'état des connaissances mais est sujet à des variations mettant parfois en doute leur robustesse. Il se pourrait que cela ait été le cas dans nos expériences.

5.1.5 Serious game employé

Mon entretien d'embauche a été employé dans les deux expériences de cette thèse. L'intérêt de ce serious game est que les tâches d'apprentissage ne nécessitent pas d'interaction impliquant les traitements visuo-spatiaux. Or, c'est dans ces cas que l'intérêt de la stéréoscopie est le plus élevé mais cela est critiquable. En effet, faire reposer l'évaluation de l'intérêt de l'imagerie stéréoscopique sur des tâches pour lesquelles les indices de profondeurs sont presque exclusivement issus de la stéréoscopie réduisait la capacité à mesurer son intérêt dans d'autres contextes. Donc, dans notre cas, cela permet une condition « plancher » sur l'utilité de la stéréoscopie et abaisse les variables pouvant influencer la fatigue visuelle autant que la surestimation de l'intérêt de l'imagerie stéréoscopique pour accomplir une tâche en VR. Le serious game a été administré avec les participants assis. Les règles pédagogiques étaient circonscrites aux codes sociaux régissant l'entretien d'embauche en France. La plupart des expériences concernant l'apprentissage et particulièrement l'association SG-VR ont tendance à être uniques donc non (ou difficilement). Les thématiques et compétences sont le plus souvent uniques dans les articles revus par les pairs. Dans notre cas, mon entretien d'embauche fait partie d'une série de produit dont les modalités pédagogiques, de gameplay et d'interaction sont identiques. La validité des mesures et de nos résultats peut donc s'étendre aux produits similaires de Manzalab. Nos résultats montrent tout de même que ce serious game en réalité virtuelle cause une fatigue visuelle et que celle-ci influence l'apprentissage de manière mineure.

5.1.6 HMD employé

Les protocoles de cette thèse ont été rédigés au moment où le Samsung Gear VR SM-R321 était le HMD le plus distribué au monde. Dans notre dynamique de mesures en conditions écologiques, ce choix de HMD était donc approprié. De plus, Manzalab, à ce moment, déployait la plupart de ses contenus VR via ce terminal. Les caractéristiques techniques de ce HMD comparées aux autres sur le marché (Oculus Rift, HTC Vive) au même moment le plaçaient dans le matériel bas de gamme : son champ de vision de 90°, l'incapacité de régler l'écart des lentilles mais gérant le confort visuel par la variation de la distance de l'écran, son poids pesant sur l'avant de la tête (beaucoup sur le nez) influencent inmanquablement les mesures opérées dans notre paradigme expérimental.

Cependant, les résultats obtenus par d'autres équipes de recherche avec des équipements de meilleure qualité sont similaires aux nôtres. Au moment où cette thèse s'achève, le marché des

HMDs suit une logique similaire aux Smartphones : de nouveaux modèles un peu plus évolués sortent chaque année. Les caractéristiques techniques sont sensiblement améliorées mais pas au point de régler les problèmes de conflits sensori-moteurs toujours identifiés à l'usage de la VR. Ainsi, nos résultats restent intéressants et à jour malgré l'évolution du matériel. Cependant, tester des conditions expérimentales similaires avec d'autres modèles de casque serait nécessaire.

5.1.7 Randomisation, double aveugle, participants et éthique

Notre état de l'art s'est concentré à restituer l'appel répété des revues systématiques et méta-analyses sur l'apprentissage via serious game et/ou réalité virtuelle à apporter plus de preuves expérimentales sur l'efficacité de ces artefacts pour l'apprentissage. Cela passait par l'annonce d'une nécessité d'augmenter la qualité méthodologique des études notamment pour la VR (Lanier *et al.*, 2019). Nous pensons avoir répondu à ces appels à plusieurs égards. Premièrement, nous avons réduit le biais consistant à comparer des instructions d'apprentissage différentes d'un dispositif (PC *versus* HMD). Deuxièmement, nous avons systématiquement recouru à une assignation randomisée des participants à chaque condition expérimentale. Troisièmement, pour une de nos études nous avons opéré à des essais en double aveugle. À notre connaissance, il s'agit de la première étude ayant recours à cette méthodologie dans le cadre de l'apprentissage via SG-VR autant que l'évaluation de la fatigue visuelle. À défaut nous avons maintenu a minima la simple aveugle pour la seconde expérience. Quatrièmement, nous avons soumis nos protocoles pour approbation auprès d'un comité d'éthique (CER Paris Descartes) augmentant donc les standards de respect et de protections des participants à nos expériences. A ce titre, nous appliquons la nécessité de pragmatisme énoncée par Bonfils afin d'évaluer le rapport de l'humain à cette technique qu'est la réalité virtuelle, couplée au serious game dans notre cas (Bonfils, 2015).

5.2 EFFICACITE D'APPRENTISSAGE VIA HMDS AVEC ET SANS STEREOSCOPIE

La revue successive des vues d'ensemble précédentes et l'ajout de nos résultats concernant l'efficacité d'apprentissage avec SG, VR, SG-VR et S3D viennent confirmer une bonne efficacité d'apprentissage avec ces dispositifs voire même supérieurs à d'autres modalités. Cependant, les risques (notamment de fatigue visuelle) sont très rarement mesurés et adressés. De plus, la qualité des expériences sont souvent critiquées. Les articles inclus (via des critères plus stricts que les précédentes vues d'ensemble) dans notre revue sont de meilleure qualité. Par ailleurs, nous observons une montée en qualité des expérience en 2019 comparées aux précédentes. Ainsi, il faut considérer cette variabilité de la qualité des études selon les années. Enfin, les apprentissages d'un article à l'autre sont très hétérogènes. Donc, les instructions sont très variées autant que les méthodes de mesure d'apprentissage. Pour autant, les résultats de nos revues successives vont dans le sens des vues d'ensemble précédentes : ces dispositifs sont efficaces pour apprendre mais plus de travaux expérimentaux sont nécessaires afin de mieux appréhender puis mesurer les conditions de cette efficacité. Ce sont les conditions pour opérer à des revues systématiques et méta-analyses robustes. Nous nous sommes donc concentrés à participer à la création de travaux expérimentaux en considérant un risque avec la SG-VR : la fatigue visuelle.

L'expérience 1 nous indique que les courbes d'apprentissage sont meilleures en HMDs qu'en PC en cohérence avec de précédentes études (Bouvier *et al.*, 2008 ; Z. Feng *et al.*, 2018 ; Menin *et al.*, 2018 ; Schmoll *et al.*, 2013 ; Webster, 2015). Mais les performances brutes sont meilleures en PC. Cependant, nos résultats avec HMD sont cohérent avec de précédents travaux sur l'apprentissage court terme, correspondant à notre mesure de performance (Schmoll *et al.*, 2013 ; Webster, 2015). La stéréoscopie ne conduit pas à une meilleure courbe d'apprentissage que l'imagerie bi-oculaire. L'apprentissage (code sociaux : entretien d'embauche) n'est pas basé sur la détection d'objets dans l'espace ou l'interaction visuo-spatiale contrairement aux travaux précédents (Fergo *et al.*, 2017 ; Loup-Escande *et al.*, 2017 ; Price, Lee, Subbarao, Kasal, & Aguilera, 2015b). Cela peut expliquer les différences de résultats ou leur puissance comparé aux précédentes études. Selon nous, cela est lié à deux éléments : l'expertise sur le dispositif et la fatigue visuelle. Concernant l'expertise avec les HMDs, la plupart des participants à l'expérience 1 ne possèdent pas de HMD et ne se considèrent pas familiers avec ce dispositif (voir Figure 59). Ils n'avaient donc pas autant l'habitude des interactions avec HMD et découvraient encore le dispositif sans le maîtriser autant qu'un PC avec souris d'ordinateur.

L'expérience 2 nous indique qu'afficher cycliquement de la stéréoscopie (passer de bi-oculaire à binoculaire) fatigue plus qu'afficher de la stéréoscopie sans interruption et que lorsque la fatigue visuelle est élevée, cela a tendance à conduire à un moins bon apprentissage en VR. Le conflit accommodation-vergence mobilise la mémoire de travail pour préserver la constance perceptuelle et cela pourrait être un facteur de réduction des ressources allouées aux tâches d'apprentissage. A travers nos deux expériences il y a, selon nous, une preuve supplémentaire du lien entre fatigue visuelle et charge cognitive comme identifié dans de précédents travaux (F. Daniel & Kapoula, 2019). Plus la fatigue visuelle est grande, moins les sujets apprennent efficacement. Cependant, aucun teste de corrélation dans nos expériences ne vient corroborée cette observation.

Discuter de nos résultats à partir de la littérature précédente semble trop incertain, car le contexte est très différent. Cependant, la fatigue visuelle était plus élevée avec la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute et cette condition est principalement celle qui a une courbe d'apprentissage plus basse pour un apprentissage à court et à long terme (sauf pour les scores en jeu de E3). Les travaux de Daniel et Kapoula montrant un lien entre le conflit accommodation-vergence et la charge de travail (F. Daniel & Kapoula, 2019) pourraient constituer un éclairage sur nos résultats. Plus la fatigue visuelle est grande, moins les sujets apprennent efficacement. Comme le groupe A et le groupe C de l'expérience 2 ont une fatigue visuelle semblable, les effets sur l'apprentissage sont similaires. Cependant, les courbes de temps de réponse du groupe C au cours de l'apprentissage à court terme sont meilleures que celles du groupe A.

Les travaux présentés dans l'état de l'art créaient délibérément des conditions expérimentales dans lesquelles la discrimination de la profondeur était nécessaire rendant la stéréoscopie utile. L'apprentissage de notre serious game ne dépendait pas de la discrimination de la profondeur. La plus-value de la stéréoscopie n'est pas visible. Donc l'usage de la stéréoscopie n'est pas forcément nécessaire. Contrairement à la plupart des précédentes études, nos expériences se concentrent sur l'apprentissage de l'entretien d'embauche. Cela diverge des apprentissages procéduraux, des mathématiques, de la physique et de la biologie. Dans notre cas, il s'agit ici de

codes sociaux. Notre contribution étend donc le champ de considération des preuves d'efficacité des SG et de la VR à d'autres type d'apprentissages. En l'occurrence, ce SG est efficace pour apprendre la conduite à tenir l'entretien d'embauche. Lorsqu'en VR, la courbe d'apprentissage est meilleure et va donc en faveur de ce dispositif pour l'administrer.

Nous avons utilisé un set up au plus proche des pratiques de production industrielles avec un environnement virtuel réellement distribué. Malgré une faible disparité, peu de mouvements et la position assise, une fatigue visuelle est identifiable en HMD. Ce cas de faibles conflits sensori-moteurs, dans un contexte de charge sur la mémoire de travail relativement élevée (apprentissage), est à considérer comme plancher aux risques pour le système visuel. À notre connaissance, notre première expérience est la première menée en double-aveugle dans la littérature spécialisée dans notre domaine. L'expérience 2 que nous avons menée est la première à tester la stéréoscopie cyclique. Ces deux expériences participent donc à délimiter les conditions d'apparition de la fatigue visuelle en HMD lors de tâches d'apprentissage. Elles permettent également d'évaluer la plus-value du dispositif HMD par rapport au PC ainsi que la plus-value de l'imagerie binoculaire comparée à l'imagerie bi-oculaire. Ces apports complètent donc efficacement les connaissances sur la fatigue visuelle en HMD par rapport à l'état de l'art.

5.3 FATIGUE VISUELLE ET SA REDUCTION

Les précédentes études créaient délibérément des conditions expérimentales fatigantes pour évaluer la fatigue visuelle. Nous avons utilisé un dispositif au plus proche des pratiques de production industrielles avec un environnement virtuel réellement distribué. Malgré une faible disparité, peu de mouvements et la position assise, une fatigue visuelle est identifiable en HMD. Ceci est cohérent avec les études précédentes (Hoffman, Girshick, Akeley, & Banks, 2008 ; Wann *et al.*, 1995). Ce cas de faibles conflits sensori-moteurs, dans un contexte de charge sur la mémoire de travail relativement élevée (apprentissage), est à considérer comme plancher aux risques pour le système visuel. À notre connaissance, l'expérience 1 que nous avons menée est la première en double-aveugle. L'expérience 2 que nous avons menée est la première à tester la stéréoscopie cyclique dans le cadre de l'apprentissage. Ces deux expériences participent donc à délimiter les conditions d'apparition de la fatigue visuelle en HMD lors de tâches d'apprentissage. Ces apports complètent donc efficacement les connaissances sur la fatigue visuelle en HMD par rapport à l'état de l'art : nous mettons à jour la littérature sur la fatigue visuelle avec les HMDs de nouvelle génération, nous testons la fatigue visuelle avec des tâches d'apprentissage, nous testons la fatigue visuelle dans un contexte écologique et avec un environnement virtuel abaissant les autres conflits sensori-moteurs (e.g. : la vection) pour nous concentrer sur la fatigue visuelle.

La plupart des paradigmes expérimentaux analysant le stress visuel causé par la stéréoscopie consistent à comparer un contenu en imagerie bi-oculaire à un contenu en imagerie stéréoscopique. Nous avons en partie reproduit ces conditions expérimentales dans l'expérience 1. La disparité conseillée par Oculus (valeur par défaut dans le SDK pour Unity) a été appliquée sur notre serious game ce qui correspond à un cadre de pratiques réelles de production. Il a ainsi permis de quantifier la fatigue visuelle provoquées par les deux imageries en conditions dites écologiques. Les prédictions étaient H_{exp13} : l'imagerie binoculaire (S3D) conduit à plus de fatigue visuelle que l'imagerie bi-oculaire (2D). Cette hypothèse est soutenue uniquement par

des tendances sur la base de 6 mesures optométriques. Nos résultats montrent qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les deux imageries. Cependant, ces tendances sont cohérentes avec les précédentes études (Mon-Williams *et al.*, 1993 ; Mon-Williams & Wann, 1998 ; Rushton & Riddell, 1999 ; Ujike & Watanabe, 2015) ainsi que les études conduites au même moment par d'autres équipes (Hirota *et al.*, 2019). Kweon *et al.* montrent que l'inconfort est plus important en VR qu'avec un écran affichant de la 2D et que cela dépend de la complexité des scènes : mouvements changements brusques, différentes valeurs de parallaxe dans la scène (Kweon *et al.*, 2018). Cette complexité n'était pas présente dans notre serious game : les mouvements dans les scènes étaient rares et la disparité a été appliquée sur les boîtes de dialogue et le texte. Ceux-ci ne restent pas affichés longtemps. Pourtant, dans d'autres travaux, le temps d'exposition de nos conditions expérimentale (± 30 minutes) conduit à une fatigue visuelle notamment détectée sur le seuil critique de fusion (Chao *et al.*, 2019). Le PPA dans l'étude de Chao *et al.* est impacté après 1h d'exposition tandis que dans notre cas il l'était dès 30 minutes et même avec l'imagerie bi-oculaire. L'expérience 1 a cependant pu établir que la fatigue visuelle en HMD est plus élevée qu'avec PC. Cela est cohérent avec des travaux menés par d'autres équipes au même moment (X. Yu *et al.*, 2018 ; Yuan *et al.*, 2018). L'absence de différence statistiquement significative entre S3D et 2D en HMD peut selon nous s'expliquer par la faible disparité appliquée, la position assise des participants et le peu de mouvement dans les scènes de l'environnement virtuel employé par nos soins. Les conflits sensori-moteurs étaient assez faibles. Surtout lorsque nous comparons notre set up aux précédentes études. Cependant, même dans ce cas de conflit-sensorimoteurs faibles : une fatigue visuelle en HMD est déjà identifiée. On peut légitimement penser que si les conflits sensori-moteurs sont plus élevés, la fatigue visuelle sera plus importante avec la S3D comparée à la 2D, à l'image de précédentes études. En contradiction avec le reste de la littérature, Yuan *et al.* appellent à proscrire l'imagerie bi-oculaire car, selon les auteurs, elle causerait le plus de fatigue visuelle (Yuan *et al.*, 2018). Nos résultats ne vont pas en ce sens. Cependant, force est de constater que les conditions optiques en HMD (Bando *et al.*, 2012) causent une fatigue visuelle même avec l'imagerie bi-oculaire. Cela n'est pas circonscrit à l'affichage stéréoscopique. Par ailleurs, la fatigue visuelle plus importante avec la stéréoscopie cyclique nous montre que l'effort répété d'interpréter des stimuli conflictuels sont liés car comparé au maintien d'une stéréoscopie maintenue, l'adaptation du système visuel semble moins impacter négativement le système oculomoteur. Il réside en ce phénomène une preuve, selon nous, du lien entre fatigue visuelle et mémoire de travail : le cerveau est mobilisé pour maintenir la constance perceptive et cela active les mécanismes de fatigue.

Malgré des résultats non statistiquement significatifs en expérience 1, la littérature précédente et les résultats des études menées par d'autres équipes en parallèle de nos travaux indiquaient la nécessité de chercher des solutions pour abaisser les risques de fatigue visuelle en HMD. C'est l'objet de l'expérience 2 de cette thèse. Nous avons évalué l'impact de l'affichage cyclique de la stéréoscopie. Le raisonnement était simple : si la fatigue visuelle est moins élevée avec l'imagerie bi-oculaire, afficher la stéréoscopie uniquement de temps en temps devrait réduire la fatigue visuelle comparé à l'affichage continu de la stéréoscopie. D'abord nous avons vérifié si la stéréoscopie cyclique influençait les variables optométriques des participants. Le Punctum Proximum of Accommodation (PPA) et l'acuité visuelle (AV) sont statistiquement

différents entre la pre-exposition et la post-exposition avec la S3D cyclique. La prédiction de H_{exp21} est donc soutenable. Les prédictions de H_{exp22a} étaient un stress visuel moins différent (avec a minima tendance à être moins élevée) en S3D cyclique comparée à classique. C'est le contraire : la S3D cyclique fatigue plus que la S3D classique. Ces résultats sont donc une surprise mais sont cependant cohérents avec la précédente littérature (T. Cai *et al.*, 2017). De précédentes études ont souligné l'avantage possible de n'afficher de la stéréoscopie qu'à des moments donnés (Bouaniche & Leroy, 2016) ou au repos donc l'arrêt de l'exposition puis sa reprise (J. Guo *et al.*, 2019) : cependant il s'agit dans ces cas de stéréoscopie intermittente et non cyclique. H_{exp22b} nous permettait de distinguer la temporalité des cycles. La condition B de cette expérience affichée la stéréoscopie chaque minute. Cette condition s'est révélée la plus fatigante comparée aux 2 autres. Malgré l'échec de réduction du stress visuel à travers cette technique de stéréoscopie cyclique, cela nous renseigne sur un aspect plus fondamental du phénomène dans le contexte de l'apprentissage en HMD. Demander au système visuel humain de fusionner des images causant un conflit accommodation-vergence à plusieurs reprises, activant la stéréopsie de manière répétée mais non maintenue, est fatigant. Cela est plus fatigant que d'activer la stéréopsie avec un conflit une fois puis le maintenir. Cai *et al.* abondent en ce sens (T. Cai *et al.*, 2017). À l'image de changements fréquents des couleurs des images (Jeong-Yeop Kim *et al.*, 2016), changer fréquemment les informations de profondeur en HMDs fatiguent plus. Nos résultats ne concordent pas avec les résultats précédents de Matsuura, qui signalaient une diminution de la fatigue visuelle (S. Matsuura, 2013). Cette différence peut s'expliquer par des différences de conditions expérimentales :

- 1) les résultats de Matsuura reposent uniquement sur des questionnaires, et non sur des variables optométriques. Notre mesure de l'inconfort visuel est en accord avec ses résultats.
- 2) nos environnements virtuels ne sont pas similaires. Matsuura teste l'apprentissage de la physique (mouvements de rotation) avec des représentations métaphoriques. La réalisation des tâches implique des interactions en 3D (dans l'espace). Notre serious game porte sur des codes sociaux et ne requière pas d'interaction dans l'espace. Donc, la demande d'effort du système visuel est moins élevée avec notre serious game qu'avec les tâches de Matsuura. Ainsi, la stéréoscopie intermittente dans son cas pourrait réduire une partie de tous les conflits sensori-moteurs.
- 3) la stéréoscopie n'est pas affichée par le même dispositif chez Matsuura car nous utilisons un HMD,
- 4) la stéréoscopie cyclique était affichée uniquement au début de l'exposition alors que la nôtre était affichée cycliquement pendant toute la durée d'exposition
- 5) la durée d'exposition à la stéréoscopie de Matsuura était d'environ 20 minutes et inférieure à 10 minutes pour la stéréoscopie cyclique, mais nos conditions ont été testés pendant 34 minutes. Or, nous avons indiqué une corrélation entre le temps de réponse (donc temps d'exposition) et la fonction accommodative via le PPA.

Les résultats de notre expérience 2 ne correspondent pas non plus à ceux de Bouaniche et de Leroy (Bouaniche & Leroy, 2016). Les mêmes différences identifiées avec Matsuura peuvent expliquer nos résultats contradictoires avec Bouaniche et Leroy à l'exception du point 1). En

effet, ils évaluent la fatigue visuelle via des variables optométriques. La variable qui a le plus fluctué dans notre étude est l'acuité visuelle (AV). L'impact le plus défavorable se trouve avec la stéréoscopie cyclique affichée chaque minute (groupe B). L'étude de Guo *et al.* montre des résultats différents : leur groupe avec des pauses au cours de l'exposition (pour les sujets au repos) présentait moins de fatigue (J. Guo *et al.*, 2019). La différence de résultats entre notre étude et Guo *et al.* peuvent être expliqués par le temps d'exposition et le type de stimuli, car les tâches visuelles sont plus difficiles dans leur étude. D'autres études soulignent le fait que l'imagerie bi-oculaire serait plus fatigante que la stéréoscopie car avec les HMDs, la vision serait « plus naturelle » avec la stéréoscopie classique malgré le conflit d'accommodation de vergence (Yuan *et al.*, 2018). Cependant, le résultat de leur méta-analyse se base sur un nombre d'article faible (N=17) et réduit donc considérablement la capacité à considérer plusieurs cas d'exposition à la stéréoscopie.

Par conséquent, la stéréoscopie cyclique a des effets sur la fatigue visuelle. D'après nos résultats, ces effets semblent négatifs pour la fatigue visuelle. La stéréoscopie cyclique n'est pas efficace pour réduire la fatigue visuelle. Essayer d'appliquer l'intermittence uniquement au début ou à la fin, comme les études précédentes, pourrait aider à mieux comparer les résultats avec les travaux précédents.

En ce qui concerne l'efficacité de l'apprentissage liée à la fatigue visuelle, des travaux antérieurs ont montré que l'imagerie binoculaire entraînait davantage de fatigue visuelle que l'imagerie bi-oculaire. Le conflit accommodation-vergence est en cause. Ce conflit peut entraîner une fatigue cognitive plus importante comparé à des conditions où ce conflit est moins élevé ou inexistant (Mistry *et al.*, 2013). Le conflit accommodation-vergence peut également en être un indicateur de fatigue cognitive (Iwasaki, 1993). Dans notre expérience, il faut considérer que les images binoculaires n'est pas déterminante dans notre serious game.

5.4 QUALITE D'EXPERIENCE EN HMD AVEC ET SANS STEREOSCOPIE

L'expérience 1 nous indique que les HMDs conduisent à un inconfort visuel plus élevé qu'en PC. En revanche, la Présence et le Flow sont similaires d'un dispositif à l'autre et d'une imagerie à l'autre. L'expérience 2 nous indique que l'inconfort visuel ne varie pas forcément en lien avec les résultats optométriques. La Présence et le Flow vont également à l'encontre de nos prédictions périphériques indiquant une influence négative de la fatigue visuelle sur la QoE. Dans le cadre de l'apprentissage, ces résultats nous indiquent les différences de Présence et Flow entre dispositifs peuvent en partie s'expliquer par le biais consistant à évaluer les instructions plutôt que les dispositifs. Cependant, l'inconfort visuel est plus élevé en HMD qu'en PC ce qui montre un effet négatif des HMDs sur la qualité d'expérience. Cependant, nos résultats discordants de l'expérience 2 comparant des imageries uniquement nous invitent à la prudence sur l'interprétation à donner sur la base de ces questionnaires. Nous discutons le recours aux questionnaires (et ceux employés par nos soins particulièrement) pour évaluer la QoE en section 5.1.4.

L'expérience 1 compare l'effet de la fatigue visuelle sur la QoE. Cependant, nos résultats renseignent également sur les effets du dispositif et de l'imagerie. Contrairement à de précédentes études, nous avons utilisé le même serious game. Nos résultats pour la Présence sont identiques

selon le dispositif ou l'imagerie là où de précédentes études trouvaient des différences (Freeman *et al.*, 1999 ; Schrader & Bastiaens, 2012 ; D. Thalmann *et al.*, 2016). Nos résultats pour le Flow sont identiques également entre conditions comme des travaux antérieurs (Takatalo *et al.*, 2011) mais en incohérence avec des travaux précédents (Hupont *et al.*, 2015 ; Schmoll *et al.*, 2013). Ces précédentes études comparent le plus souvent des HMDs à des ordinateurs, des tablettes ou des livres mais les instructions d'apprentissage sont très différentes. Pour la Présence et le Flow, on constate donc que H_{exp12} n'est pas soutenue : la fatigue visuelle n'a pas d'impact négatif sur ces deux marqueurs de la QoE. En revanche, l'inconfort visuel est plus élevé en HMD, à l'image de précédents travaux (J. Guo, Weng, Duh, Liu, & Wang, 2017), pour les groupes ayant présenté une fatigue visuelle plus importantes que devant un PC. L'expérience 2 compare des types d'imageries. Ici, le groupe avec la plus haute fatigue visuelle est celui ayant rapporté l'inconfort visuel le moins élevé et ayant rapporté la Présence la plus basse. Le Flow rejoint l'Inconfort Visuel avec les groupes affichant de la stéréoscopie cyclique rapportant ce marqueur plus élevé. H_{exp25} peut être soutenue. Globalement, et donc indépendamment du dispositif, le Flow et la Présence sont moyens et hauts dans nos expériences (entre 3 et 4 sur les échelles de Likert graduées de 1 à 5) : cela montre que le serious game a conduit à une bonne qualité d'expérience rapportée par les participants.

L'expérience 2 montre que les participants exposés à la stéréoscopie cyclique affichée toutes les 3 minutes (groupe C) ont également évalué leur présence plus faible que celle du groupe stéréoscopique classique, mais sans différence statistiquement significative. Ce résultat ne correspond pas aux deux autres résultats de qualité d'expérience. Cette différence pourrait s'expliquer par les limites connues avec de tels questionnaires (Slater, 2004). Cependant, le résultat est conforme aux mesures optométriques et aux courbes d'apprentissage.

Comme l'on pouvait s'y attendre avec les résultats des précédents travaux : plus la fatigue visuelle est élevée, plus l'inconfort visuel est élevé. Cela se vérifie via nos propres expériences. En revanche, lorsque les contenus sont très similaires, comme dans nos conditions expérimentales, aucune différence n'est trouvée entre PC et HMD pour le Flow et la Présence. L'imagerie bi-oculaire et binoculaire conduisent à des sentiments de Flow et de Présence similaires. Avec un focus sur la fatigue visuelle, on voit qu'elle n'est pas statistiquement différente entre les deux conditions de cette étude. Dans notre cas, son influence semble donc mineure. En revanche, dans notre seconde étude, ces deux marqueurs varient. Cette variation va à l'envers de nos prédictions car les groupes avec stéréoscopie cyclique affichent de meilleurs scores de Présence et de Flow mais une plus haute fatigue visuelle. Selon nous, les biais psycho-linguistiques (interprétation des termes, compréhension des questions) de ces questionnaires sont à considérer (Slater, 2004) pour expliquer de tels résultats.

Pour l'aspect apprentissage, les dispositifs (PC ou HMD) ne montrent pas de différence. Webster indique que cela pourrait être dû à la similarité des instructions (Webster, 2015) : les précédentes études mesurant Flow et Présence selon un dispositif le faisait avec des contenus trop différents, de plus, ils ne mesuraient pas l'effet du dispositif mais celui des instructions. Dans notre cas, à instruction identiques, la Présence et le Flow étaient identiques en PC et HMD, en imagerie bi-oculaire et binoculaire (expérience 1). La fatigue visuelle n'a pas semblé influencer négativement ces deux marqueurs. En revanche, l'inconfort visuel est plus élevé en HMD qu'en

PC. Cependant, l'effet de l'imagerie est variable selon l'imagerie parfois en accord ou contredisant nos prédictions. De nouveau, les biais inerrants à l'administration de questionnaires restent une explication plus probable pour expliquer nos résultats (Daehwan Kim & Ko, 2019 ; Shin, 2018).

5.5 LIENS ENTRE FATIGUE VISUELLE ET CHARGE COGNITIVE

Nous avons opéré à une démonstration des liens entre fatigue visuelle et charge cognitive sur la base de la littérature à disposition. Il apparaît les liens suivants entre fatigue visuelle et charge cognitive sont identifiables (voir section 4.3) :

- Anatomiques : le cerveau traite les deux phénomènes dans les mêmes zones
- Cognitifs (processus de traitement) : le cerveau traite les deux flux dont les comportements du système visuel sont les marqueurs.

Nos expériences n'ont pas directement mesuré ces liens et la covariance éventuelle de la fatigue visuelle et de la charge cognitive. Cela est l'ambition de nos perspectives avec l'expérience 3 (voir Annexe 8). En l'état, il s'agit donc d'une démonstration ayant conduit à réviser la définition de fatigue visuelle pour y inclure la dimension cognitive. Celle-ci était essentiellement manquante dans les approches précédentes, ce qui peut s'expliquer par :

- 1) le manque de matériel pour mesurer la charge cognitive avec les serious games et/ou la réalité virtuelle
- 2) l'essentiel des apports concernant la fatigue visuelle n'était pas dans le cadre de l'apprentissage (informatique, ingénierie, ophtalmologie) donc la charge cognitive n'était pas nécessairement une variable à considérer. La fatigue visuelle était appréhendée avec une dynamique behavioriste : c'est-à-dire de boîte noire. Des stimuli entraînent une réaction du système oculomoteur mais sans mesure ou description des processus entre les deux
- 3) la démocratisation des HMDs permettent à des équipes de recherche, se concentrant sur ce type de liens, d'accéder au matériel donc l'appréhender via ces problématiques
- 4) la nécessité de « faire fonctionner » les dispositifs (serious games et /ou réalité virtuelle) plutôt que d'évaluer leur efficacité et les risques auxquels ils exposent les utilisateurs : e.g. tester une technologie d'écran, de tracking, des interactions, une modalité d'apprentissage...

Certains de nos résultats conduisent à soutenir un tel lien. L'apprentissage était parfois moins élevé quand la fatigue visuelle était présente. Or l'apprentissage mobilise plus la mémoire de travail qu'une simple tâche d'interaction avec un objet ou d'appréhension de la profondeur (paradigmes habituellement employés pour évaluer la fatigue visuelle avec l'imagerie stéréoscopique). Les liens entre fatigue visuelle et charge cognitive restent donc à quantifier clairement et à tester expérimentalement. Il s'agit dans le cadre de nos recherches d'un apport théorique sur la base d'un faisceau de preuves expérimentales d'autres équipes de recherche et de liens explicités par certaines d'entre elles dans les communications revues par les pairs. Des apports expérimentaux venant spécifiquement tester ces liens sont nécessaires.

5.6 TRAVAUX FUTURS

Des initiatives et travaux en cours rejoignent notre dynamique afin de rationaliser l'usage et la production des contenus en VR. Dans le registre industriel et économique : le projet européen Horizon 2020 XR4ALL¹¹ dont le but est de « *renforcer l'industrie européenne de la technologie XR et accélérer sa croissance* » dont une partie du projet consiste à partager en open source les développements et le Groupement d'intérêt économique (GIE) VR connection proposant une « *Charte de recommandations sur l'usage de la Réalité Virtuelle* » (VR, 2019). La communauté scientifique, toutes disciplines confondues, s'intéresse de plus en plus à la VR ainsi qu'aux SG. Le matériel et les logiciels de développement n'ont jamais été aussi accessibles. Des travaux scientifiques sur l'inclusion de suivi des états psycho-physiologiques (cognition, rythme cardiaque, activité cérébrale, suivi oculaire) en HMD à des fins scientifiques sont par exemple très prometteurs.

5.6.1 Fatigue visuelle en HMD

Une expérience utilisant l'oculomètre et le rythme cardiaque afin de mesurer la fatigue visuelle est nécessaire (voir Annexe 8). Il s'agirait de mesurer la variation de la fatigue visuelle selon le temps d'exposition ce qui est difficilement réalisable avec des mesures pre- et post-exposition. Globalement, nous pensons que le recours à des outils de mesure intégrés dans les HMDs, pendant l'exposition, pourront permettre de mieux mesurer et qualifier la fatigue visuelle. À cet effet, l'intégration en cours de l'imagerie cérébrale offre un horizon intéressant sur la précision des mesures opérées (Gyoung Kim, Jeon, & Biocca, 2018a).

Des paradigmes expérimentaux permettant des mesures plus nombreuses faisant varier : la disparité rétinienne appliquées aux images, le degré d'interaction en profondeur, la difficulté des tâches et la charge cognitive sont à envisager. Les dispositifs numériques susceptibles de causer une fatigue visuelle se multiplient mais nous nous concentrons uniquement sur les HMDs : le nombre de modèles exponentiel et les prix attractifs laissent présager une adoption massive possible. Or, les nombreuses utilisations et les contenus variés sont autant de risques non mesurés auxquels les utilisateurs vont s'exposer avant que les autorités sanitaires n'aient les moyens de les évaluer et d'imposer des normes.

Des travaux fondamentaux sur les mécanismes de la fatigue visuelle en environnement virtuel restent à mener. Cependant, des travaux sur ces mécanismes en conditions écologiques sont également à conduire. En effet, les usages des HMDs se développent plus rapidement que la capacité des équipes de recherche et des autorités sanitaires à comprendre les effets possibles de telles technologies. Des études longitudinales sont notamment nécessaires pour observer sur des cohortes et le long terme les effets de la fatigue visuelle causée par les HMDs sur l'humain. À ce titre, il paraît opportun d'étendre le champ de ces recherches à la réalité augmentée, en forte croissance. Cette extension doit également considérer plusieurs modèles de HMDs. Dans la suite de nos recherches, tester directement les hypothèses de covariance de la fatigue visuelle et de l'apprentissage est nécessaire. Il s'agira de définir si une fatigue visuelle élevée abaisse l'apprentissage.

¹¹ <http://xr4all.eu/> page consultée le 27/12/2019

Courant 2020, l'Anses va remettre un rapport sur les impacts sanitaires de la réalité virtuelle et augmentée sur l'humain. Les entreprises, telles que Manzalab, auront de plus en plus de normes à respecter afin de garantir des expériences immersives confortables et peu risquées aux utilisateurs. Il y a donc les enjeux sanitaires autant qu'industriels à mieux comprendre et maîtriser les risques de fatigue visuelle, notamment, en réalité virtuelle et réalité augmentée. Cela implique plus de recherches sur ces problématiques.

5.6.2 Apprentissage et Serious Games en réalité Virtuelle

Il n'y a pas, à ce jour, une manière unifiée de quantifier et évaluer l'apprentissage. Cela touche les serious games en réalité virtuelle. Or, surtout dans le cadre de la formation, les apprenants et organismes financeurs souhaitent calculer un retour sur investissement. Même en dehors de ces considérations économiques, l'efficacité des serious games combinés à la réalité virtuelle reste à démontrer. En l'état des connaissances, il convient de multiplier les apports expérimentaux avec de hauts standards méthodologiques pour faciliter la formalisation de méta-analyses. Cela implique de tester l'efficacité de la combinaison serious game-réalité virtuelle dans des contextes et des savoirs à acquérir variés. La création d'une base commune de métriques de l'apprentissage puis de paradigmes permettant de comparer les modalités de manière effective est nécessaire. Cela peut alimenter la dynamique de création d'agents virtuels (assistant d'apprentissage) aidant l'apprenant dans l'environnement virtuel. Surtout, cela va permettre d'aboutir à des formations diplômantes impliquant l'usage des serious games et de la réalité virtuelle.

À ce titre, notre expérience 3 (Annexe 8) permettra d'asseoir le recours au score en jeu et du temps de réponse comme des marqueurs de l'apprentissage. Le recours à l'oculomètre afin de monitorer le comportement et la cognition participera à éprouver des paradigmes expérimentaux reproductibles et créer une base méthodologique commune pour appréhender l'apprentissage avec les HMDs. En effet, l'usage des HMDs à des fins d'apprentissage apparaît comme l'un de ceux à croissance forte (Arnaldi *et al.*, 2018).

5.6.3 Liens entre fatigue visuelle et charge cognitive

Nous avons démontré qu'un lien entre charge cognitive et fatigue visuelle émergeait dans la littérature. Qualifier les mécanismes de tels liens et leurs conséquences sur l'ergonomie en réalité virtuelle, particulièrement lors de l'apprentissage, reste à établir. Notre expérience 3 sera un premier apport en ce sens. Si de tels liens devaient se vérifier, des recherches plus fondamentales encore seront à mener sur les conséquences chez l'humain. De manière indirecte cela rejoint les questionnements sur les conséquences de changement de stratégie d'adaptation de l'humain (biologie de l'évolution) par les environnements virtuels et le numérique. Le débat scientifique actuel sur la mise à jour des théories cognitivistes via la cognition incarnée nous apparaît intéressante pour cette problématique. Des liens entre cognitions et fatigue visuelle, donc entre état cognitif et état oculomoteur, en réalité virtuelle revêt un cas appliqué approprié pour tester les prédictions de la cognition incarnée.

5.6.4 Ratio bénéfiques/risques pour l'adoption du numérique dans l'apprentissage

Les travaux futurs décrits plus avant concernant les risques et bénéfices psycho-physiques ainsi que psycho-physiologiques. Ce travail de thèse s'est concentré sur un risque : la fatigue visuelle.

De nombreux autres existent lorsqu'il s'agit d'immerger des humains en réalité virtuelle ou augmentée. Leur qualification et quantification exacts reste un travail de recherche à mener. Dans le même temps, les bénéfices sont à circonscrire de la même manière. Formaliser des outils de prise de décision sur l'adoption ou non du numérique (ici la réalité virtuelle et augmentée) sur la base d'un ratio bénéfices / risques pour l'humain sera alors possible (à l'image de la démarche employée pour les traitements médicaux). En effet, les arguments le plus souvent avancés reposent trop peu sur des preuves scientifiques. L'utilité de cette démarche serait de rationaliser l'adoption ou non de certaines technologies à des fins d'apprentissage.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse s'est concentrée à rechercher les impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle. Nous avons listé 5 questions de recherche traduites en apports nécessaires afin d'y répondre. Nous avons mené un état de l'art afin d'appréhender le serious games, la réalité virtuelle ainsi que leur combinaison (SG-VR), le fonctionnement du système visuel humain (particulièrement pour percevoir la profondeur) et la manière dont il est stimulé en HMD, puis la fatigue visuelle et sa diminution. À l'issue de cet état de l'art, nous avons constaté que la réponse à nos questions de recherche devait passer par des apports : documenter les preuves d'efficacité d'apprentissage avec ces dispositifs sociotechniques, procéder à des travaux expérimentaux pour mettre à jour et compléter les connaissances sur la fatigue visuelle causée par la stéréoscopie, essayer de diminuer cette fatigue visuelle en HMD, mesurer l'apprentissage et la qualité d'expérience avec un SG-VR. Cela s'est donc traduit par 5 apports qui sont : 1 revue de la littérature sur l'efficacité d'apprentissage en SG, VR, la combinaison SG-VR et la S3D ; 2 expériences incluant 152 participants, testant 7 conditions expérimentales portant d'une part sur la différence de fatigue visuelle, d'efficacité d'apprentissage puis de qualité d'expériences selon le dispositif (HMD versus PC), selon le type d'images (S3D versus 2D) et d'autre part sur le test de la stéréoscopie cyclique dans le but d'abaisser la fatigue visuelle ; enfin une démonstration théorique des liens entre fatigue visuelle et charge cognitive.

Afin de réaliser notre revue de la manière la plus précise possible, nous avons spécifié les mots clefs employés, les 11 bases de données interrogées et les critères d'inclusion et d'exclusion. Afin de réaliser nos deux expériences, nous avons mesuré l'apprentissage avec la performance et la rétention via les scores, les bonnes/mauvaises réponses et le temps de réponse des serious games ; nous avons mesuré la fatigue visuelle via 6 mesures optométriques (Acuité Visuelle, Tâche de fusion anaglyphes, Point de fusion et de rupture, Acuité Stéréoscopique, Rapidité d'accommodation, Punctum proximum d'accommodation) ; nous avons mesuré la qualité d'expérience via 3 questionnaires (Présence, Flow et Inconfort Visuel) ; nous avons testé la stéréoscopie cyclique afin de réduire la fatigue visuelle. Ces expériences ont été menées avec un serious game pour apprendre l'entretien d'embauche. Le serious game a été déployé sur Samsung Gear VR avec un Samsung Galaxy 6. Les standards éthiques relatifs aux expériences scientifiques non-interventionnelles impliquant la personne humaine ont été respectés et ont fait l'objet d'un avis favorable d'un Comité d'Ethique pour la Recherche indépendant. Les expériences ont été conduites dans un contexte écologique (proches des usages réel), dans la dynamique de pouvoir employer cette démarche dans l'entreprise d'accueil afin d'instaurer des méthodes d'évaluation des contenus créés en général. Nos expériences ont donc été imaginées pour pouvoir être reproduites facilement dans le cadre industriel.

Nos 5 apports nous permettent de qualifier les questions de recherche établies au début de ces travaux :

La communication du savoir selon le dispositif (serious game sur PC ou HMD) est-elle efficace ? La présentation des précédentes vues d'ensemble et la conduite de notre revue de

l'efficacité d'apprentissage en SG, VR, SG-VR montre que ces dispositifs sont efficaces pour apprendre et qu'ils ont tendance à être plus efficace comparé à d'autres modalités (PowerPoint, interfaces web, livres papier). Les résultats de nos deux expériences vont en ce sens. La courbe d'apprentissage en HMD est plus élevée qu'en PC. En revanche, la performance d'apprentissage brut est meilleure en PC. Mais la rétention est meilleure avec HMD qu'avec PC. Donc, la communication du savoir via serious game en réalité virtuelle est efficace. Ce phénomène est un bénéfice pour l'apprentissage en SG-VR.

La communication du savoir selon le type d'image (bi-oculaire ou binoculaire) est-elle efficace ? La présentation des précédentes vues d'ensemble et la conduite de notre revue de l'efficacité d'apprentissage en S3D montre qu'elle est associée avec une efficacité supérieure à l'imagerie bi-oculaire. Cependant les travaux expérimentaux spécifiquement sur les HMDs sont encore très rares. Les résultats de nos deux expériences, réalisées avec un serious game avec des enjeux de discrimination de la profondeur afin d'accomplir les tâches d'apprentissage, montrent que l'efficacité d'apprentissage n'est pas plus efficace en S3D. Donc, il n'est pas obligatoire d'afficher de la S3D et ne pas l'afficher est un moyen de réduire les risques de fatigue visuelle. Lorsque de la stéréoscopie cyclique est affichée, la rétention est négativement impactée. Cela est notamment dû, selon nous, à la fatigue visuelle. Ce phénomène est un risque pour l'apprentissage en SG-VR.

Comment les yeux humains (des senseurs) sont impactés (fatigue visuelle) par le dispositif donc comment l'information visuelle est traitée par le système visuel ? Nos expériences montrent que la stéréoscopie affichée en HMD provoque une fatigue visuelle chez l'humain. Notre tentative afin de réduire cette fatigue visuelle via la stéréoscopie cyclique s'est avérée plus fatigante que la stéréoscopie standard. Cela nous renseigne sur la manière dont le système visuel humain gère les conflits sensori-moteurs à l'origine de la fatigue visuelle : le conflit accommodation-vergence modifie les fonctions oculomotrices en HMD. Cette modification s'opère même sans l'affichage de stéréoscopie. Ce phénomène est un risque pour l'apprentissage en SG-VR.

Comment la fatigue visuelle impacte l'apprentissage dans le dispositif SG-VR donc comment la baisse de performance du système visuel humain impacte l'apprentissage ? Nos expériences montrent que demander au système visuel de fusionner deux images (une pour chaque œil) conflictuelles à plusieurs reprises dans le temps comporte un effort de traitement (cognitif) important. Dit autrement, plus les images artificielles affichées en HMD à interpréter par le cerveau comportent des erreurs (causant des conflits sensori-moteurs), plus cela affecte négativement les fonctions oculomotrices de l'humain. Donc, les yeux humains sont impactés négativement, au moins à court terme, par le dispositif (SG-VR) car une fatigue visuelle est détectée après usage d'un HMD que ce soit avec l'affichage d'images bi-oculaires ou binoculaires (stéréoscopie). Ainsi, l'information visuelle est traitée par le système visuel avec des conflits, ce qui semble accaparer des ressources de la mémoire travail et donc augmenter la charge cognitive lors de l'apprentissage. La fatigue visuelle semble donc abaisser la qualité d'apprentissage en HMD. Ce phénomène est un risque pour l'apprentissage en SG-VR.

Y a-t-il une interaction entre la gestion des conflits sensori-moteurs (conflit accommodation-vergence) du cerveau et les ressources de mémoire de travail (charge cognitive) ? Nos résultats expérimentaux et la démonstration théorique que nous opérons montrent des liens entre fatigue visuelle et charge cognitive. Ces liens apparaissent anatomiques (les deux états sont traités dans les mêmes zones du cerveau) et cognitifs (processus de traitement) car les deux phénomènes

semblent provoquer les mêmes comportements du système visuel afin de compenser les conflits sensori-moteurs provoqués par les images affichées en HMD. Donc, il apparaît qu'une interaction entre la gestion des conflits sensori-moteurs liés à la perception visuelle de la profondeur et les ressources de la mémoire de travail existe : les erreurs sensori-motrices ajoutent des traitements supplémentaires au cerveau pour conserver la constance perceptive et augmentent la charge cognitive. Ce phénomène est un risque pour l'apprentissage en SG-VR.

Nos travaux ont été communiqués à travers 8 articles dans les conférences ou journaux revus par les pairs : (Souchet, Philippe, & Leroy, 2018a ; 2019a ; 2020a ; Souchet, Philippe, Ober, Lévêque, & Leroy, 2018b ; 2019b ; 2019c ; 2020b ; Souchet, Philippe, Zobel, Ober, Lévêque, & Leroy, 2018c). Les travaux menés ont permis de mettre à jour les connaissances sur la fatigue visuelle avec les casques de réalité virtuelle. Ils ont permis d'établir que la fatigue visuelle est plus élevée en casque qu'avec un écran PC. L'étude de la stéréoscopie cyclique a permis de mieux comprendre les mécanismes de la fatigue visuelle : plus le système visuel doit compenser de manière répétée le conflit accommodation-vergence en stéréoscopie avec des retours en bi-oculaire, plus la fatigue visuelle est élevée. L'apprentissage avec la combinaison serious game et réalité virtuelle est efficace dans le contexte expérimental testé mais la fatigue visuelle semble parfois l'influencer négativement. Nos travaux ont également permis de qualifier les métriques et l'avantage futur à employer l'oculomètre pour mesurer la fatigue visuelle et la charge cognitive. Les impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage avec un serious game en réalité virtuelle sont donc :

- une faible influence négative sur les performances
- une faible influence négative sur la rétention
- l'abaissement possible des ressources de mémoire de travail
- la nécessité de limiter de temps d'exposition aux contenus d'apprentissage pour abaisser les risques de stress visuel
- la production d'expériences immersives avec des caractéristiques abaissant les risques de conflits sensori-moteurs

Les résultats de nos travaux ont eu plusieurs applications pour l'entreprise d'accueil Manza-lab. Presque tous les contenus en VR sont produits avec des images bi-oculaires (sans stéréoscopie) pour abaisser les risques de fatigue visuelle. L'essentiel des serious games en VR sont calibrés pour durer moins de 30 minutes afin de garantir les bénéfices d'apprentissage du dispositif. L'entreprise est en mesure de présenter les preuves d'efficacité avec les dispositifs qu'elle développe en pointant une partie des bénéfices et des risques inévitables. Enfin, nos travaux peuvent être consultés par les autorités sanitaires afin de mesurer les risques et bénéfices de tels dispositifs.

Plus d'apports expérimentaux et théoriques restent nécessaires pour mieux définir l'influence des conflits sensori-moteurs des environnements virtuels sur l'humain à court terme et particulièrement à long terme. Cela est également le cas pour définir l'efficacité d'apprentissage avec les serious game en réalité virtuelle. De tels apports permettront d'établir clairement les risques et les bénéfices pour les utiliser comme base de décision raisonnée sur l'usage ou non de ces dispositifs à des fins d'apprentissage. Nos futurs travaux vont donc se concentrer à opérer aux

expériences afin de qualifier ces risques et bénéfices avec des outils de mesure encore plus précis que ceux employés dans cette thèse. L'évolution des HMDs permet notamment d'employer l'oculomètre qui est un outil prometteur pour suivre l'état de l'apprenant pendant l'exposition. Ces futurs travaux et problématiques de recherche sont d'autant plus prégnantes que les études de marché indiquent une explosion à venir des casques de réalité virtuelle notamment pour apprendre. Le grand public va donc très rapidement être équipé, ce qui motive à poursuivre une logique de cadre expérimental en conditions dites écologiques. Cela permettra de procéder à des recommandations, préconisations, aux créateurs de contenus d'apprentissage en SG-VR et aux apprenants. Dans cette dynamique, considérer la VR collaborative et l'apprentissage en groupe apparaît déterminant. L'objectif demeurant de définir les risques et les bénéfices de ces technologies à des fins d'apprentissage pour un usage raisonné.

BIBLIOGRAPHIE

- A, S., Bijlani, K., & Jayakrishnan, R. (2015). An interactive serious game via visualization of real life scenarios to learn programming concepts. Communication présentée au 2015 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Denton, TX, USA. doi :10.1109/icccnt.2015.7395173
- Abdulin, Evgeniy, & Komogortsev, O. (2015). User Eye Fatigue Detection via Eye Movement Behavior (Vol. 63, pp. 1265–1270). Communication présentée au Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Seoul, Republic of Korea. doi :10.1145/2702613.2732812
- Abdulin, Evgeniy, Rigas, I., & Komogortsev, O. (2016). Eye Movement Biometrics on Wearable Devices: What Are the Limits? (pp. 1503–1509). Communication présentée au Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '16), San Jose, CA, USA. doi :10.1145/2851581.2892306
- Abt, C. C. (1970). *Serious games: The art and science of games that simulate life, 1*. Viking Compass Book, USA, 1970. New York, NY, USA : New York Viking. doi :10.1177/104687817000100406
- Adams, F. (2010). Embodied cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 9(4), 619–628. doi :<https://doi.org/10.1007/s11097-010-9175-x>
- Aguiar, C. E. S. (2018). La sacralité numérique et la mystique de la technologie. *Société*, 139(1), 97–108. doi :10.3917/soc.139.0097
- Ahn, D., Seo, Y., Kim, M., Kwon, J. H., Jung, Y., Ahn, J., & Lee, D. (2014). The Effects of Actual Human Size Display and Stereoscopic Presentation on Users' Sense of Being Together with and of Psychological Immersion in a Virtual Character. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 17(7), 483–487. doi :10.1089/cyber.2013.0455
- Ahuja, K., Islam, R., Parashar, V., Dey, K., Harrison, C., & Goel, M. (2018). EyeSpyVR: Interactive Eye Sensing Using Off-the-Shelf, Smartphone-Based VR Headsets. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2(2), 1. doi :10.1145/3214260
- Aksoy, E. (2019). Comparing the Effects on Learning Outcomes of Tablet-Based and Virtual Reality-Based Serious Gaming Modules for Basic Life Support Training: Randomized Trial. *JMIR Serious Games*, 7(2), e13442. doi :10.2196/13442
- Aksoy, E., Izzetoglu, K., Onaral, B., Kitapcioglu, D., Sayali, M. E., & Guven, F. (2019). Assessing Correlation Between Virtual Reality Based Serious Gaming Performance and Cognitive Workload Changes via Functional Near Infrared Spectroscopy. Dans D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis, *Augmented Cognition. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 11580 (pp. 375–383). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-22419-6_26

- Alaker, M., Wynn, G. R., & Arulampalam, T. (2016). Virtual reality training in laparoscopic surgery: A systematic review & meta-analysis. *International Journal of Surgery*, 29, 85–94. doi :10.1016/j.ijisu.2016.03.034
- Alexander, A. L., Brunyé, T., & Sidman, J. (2005). From gaming to training: A review of studies on fidelity, immersion, presence, and buy-in and their effects on transfer in pc-based simulations and games. *Aptima Inc. Woburn, MA*. doi :10.1037/e500852012-001
- Allain, S. (2013). *Serious game et perception du réel, lecture documentarisante et potentiel cognitif*. Thèse de Doctorat (No. 2013GRENA017). Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Allal-Cherif, O., & Makhlof, M. (2015). Serious Games and Their Use in HRM: A Typology of Uses in CAC40 Companies (pp. 652–661). Communication présentée au 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences. doi :10.1109/hicss.2015.85
- Almeida, F., & Simões, J. (2019). Serious Games in Entrepreneurship Education. Dans M. Khosrow-Pour, *Encyclopedia of Information Science and Technology* (4^e éd., pp. 800–808). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-5225-2255-3.ch069
- Amar, R. (2012). *Sensorialité et presbytie*. (B. Cochener, C. Albou-Ganem, & G. Renard, Éd.) *Presbytie* (pp. 347–370). SFO - Elsevier Masson. doi :10.1016/B978-2-294-72375-9.50031-0
- Amaro, A. C., Veloso, A. I., & Oliveira, L. (2016). Social games and different generations: A heuristic evaluation of Candy Crush Saga. Communication présentée au 2018 2nd International Conference on Technology and Innovation in Sports, Health and Wellbeing (TISHW), Vila Real, Portugal. doi :10.1109/tishw.2016.7847791
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5^e éd.). (S.l.) : American Psychiatric Association Publishing.
- Amokrane, K., & Lourdeaux, D. (2008). HERA: Learner Tracking in a Virtual Environment. *The International Journal of Virtual Reality*, 7(3), 23–30. doi :10.1111/j.1365-2729.2005.00114.x
- Amokrane, K., Lourdeaux, D., Barthès, J.-P., & Burkhardt, J.-M. (2008). An Intelligent Tutoring System for Training and Learning in a Virtual Environment for High-Risk Sites (Vol. 2, pp. 185–193). Communication présentée au 2008 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. doi :10.1109/ictai.2008.151
- Anderson, C. A. (2004). An update on the effects of playing violent video games. *Journal of Adolescence*, 27(1), 113–122. doi :10.1016/j.adolescence.2003.10.009
- Anmarkrud, Ø., Andresen, A., & Bråten, I. (2019). Cognitive Load and Working Memory in Multimedia Learning: Conceptual and Measurement Issues. *Educational Psychology*, 54(2), 61–83. doi :10.1080/00461520.2018.1554484
- Anses. (2014). *Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique*. (Anses, Éd.) *Rapport d'expertise collective*.
- Appel, T., Scharinger, C., Gerjets, P., & Kasneci, E. (2018). Cross-subject workload classification using pupil-related measures. Communication présentée au Proceedings of the 2018 ACM

Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Warsaw, Poland. doi :10.1145/3204493.3204531

Arnaldi, B., Cotin, S., Couture, N., Dautin, J.-L., Gouranton, V., Gruson, F., & Lourdeaux, D. (2018). New Applications. Dans B. Arnaldi, P. Guitton, & G. Moreau, *Virtual Reality and Augmented Reality: Myths and Realities*. (S.l.) : Wiley-ISTE.

Ashraf, A., Whelan, M., Balfe, P., & O'Sullivan, R. (2013). 3D simulation versus 2D enhances ability in standardised laparoscopic tasks. *International Journal of Surgery*, 11(8), 599–685. doi :10.1016/j.ijssu.2013.06.067

Aurat, D. (2016). *Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux*. Mine Paris Tech - PSL Research University.

Aurat, D., Hugues, O., Leroy, L., & Fuchs, P. (2016). An Adaptive Blur in Peripheral Vision to Reduce Visual Fatigue in Stereoscopic Vision (Vol. 2016, pp. 1–9). Communication présentée au Electronic Imaging, Stereoscopic Displays and Applications XXVII. doi :10.2352/issn.2470-1173.2016.5.sda-438

Azadegan, A. (2012). Serious Games Integration in Companies: A Research and Application Framework (pp. 485–487). Communication présentée au 2012 IEEE 12th International Conference on Advanced Learning Technologies. doi :10.1109/icalt.2012.236

Babu, S. K., McLain, M. L., Bijlani, K., Jayakrishnan, R., & Bhavani, R. R. (2016). Collaborative Game Based Learning of Post-Disaster Management: Serious Game on Incident Management Frameworks for Post Disaster Management. Communication présentée au 2016 IEEE Eighth International Conference on Technology for Education (T4E). doi :10.1109/t4e.2016.024

Bacher, L. F., Retz, S., Lindon, C., & Bell, M. A. (2017). Intraindividual and Interindividual Differences in Spontaneous Eye Blinking: Relationships to Working Memory Performance and Frontal EEG Asymmetry. *Journal of Materials Chemistry A*, 22(2), 150–170. doi :10.1111/infa.12164

Baddeley, A. (2010). Working Memory. *Current Biology*, 20(4), R136–R140. doi :<https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.014>

Bae, S., Eller, C., & Lang, A. (2012). Presence, physiological arousal, and visual recognition in 3D TV. *The Journal of the Korea Contents Association*, 13(2), 560–567. doi :10.5392/jkca.2013.13.02.198

Bailenson, J. N., Yee, N., Blascovich, J., Beall, A. C., Lundblad, N., & Jin, M. (2008). The Use of Immersive Virtual Reality in the Learning Sciences: Digital Transformations of Teachers, Students, and Social Context. *Journal of the Learning Sciences*, 17(1), 102–141. doi :10.1080/10508400701793141

Bajcsy, R., & Lieberman, L. (1976). Texture gradient as a depth cue. *Computer Graphics and Image Processing*, 5(1), 52–67. doi :10.1016/s0146-664x(76)80005-6

Bando, T., Iijima, A., & Yano, S. (2012). Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review. *Displays*, 33(2), 76–83. doi :10.1016/j.displa.2011.09.001

- Bang, J., Heo, H., Choi, J.-S., & Park, K. (2014). Assessment of Eye Fatigue Caused by 3D Displays Based on Multimodal Measurements. *Sensors*, *14*(9), 16467–16485. doi :10.3390/s140916467
- Banks, M. S., Allison, R. S., & Watt, S. J. (2012). Stereoscopy and the Human Visual System. *SMPTE Motion Imaging Journal*, *121*(4), 24–43. doi :10.5594/j18173
- Banks, M. S., Kim, J., & Shibata, T. (2013). Insight into vergence/accommodation mismatch (Vol. 8735). Communication présentée au Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI. doi :10.1117/12.2019866
- Baptista, G., & Oliveira, T. (2019). Gamification and serious games: A literature meta-analysis and integrative model. *Computers in Human Behavior*, *92*(10), 306. doi :10.1016/j.chb.2018.11.030
- Barfield, W. (2015). *Cyber-Humans: Our Future with Machines* (1^{re} éd.). (S.l.) : Springer-Copernicus. doi :10.1007/978-3-319-25050-2
- Barker, T. B., & Milivojevic, A. (2016). *Quality by Experimental Design* (4^e éd.). Boca Raton, FL, USA : CRC Press.
- Bavelier, D., Green, C. S., Han, D. H., Renshaw, P. F., Merzenich, M. M., & Gentile, D. A. (2011). Brains on video games. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(12), 763–768. doi :10.1038/nrn3135
- Baños, R. M., Botella, C., Rubió, I., & Quero, S. (2008). Presence and emotions in virtual environments: The influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, *11*(1), 1–8. doi :10.1089/cpb.2007.9936
- Bean, A. M., Nielsen, R. K. L., Van Rooij, A. J., & Ferguson, C. J. (2017). Video game addiction: The push to pathologize video games. *Professional Psychology: Research and Practice*, *48*(5), 378–389. doi :10.1037/pro0000150
- Beckouche, P. (2017). La révolution numérique est-elle un tournant anthropologique ? *Le Débat*, *193*(1), 153–166. doi :10.3917/deba.193.0153
- Bednarik, R., Bartczak, P., Vrzakova, H., Koskinen, J., Elomaa, A.-P., Huotarinen, A., et al. (2018). Pupil size as an indicator of visual-motor workload and expertise in microsurgical training tasks. Communication présentée au Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Warsaw, Poland. doi :10.1145/3204493.3204577
- Bellgardt, M., Pick, S., Zielasko, D., Vierjahn, T., Weyers, B., & Kuhlen, T. W. (2017). Utilizing immersive virtual reality in everydaywork. Communication présentée au 2017 IEEE 3rd Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR), Los Angeles, CA, USA. doi :10.1109/wevr.2017.7957708
- Bellini, H., Chen, W., Takayama, D., Sugiyama, M., & Kim, J. (2018). *Profiles in Innovation Revisited: Extended Reality Updating our VR/AR thesis as platform strategies democratize innovation*. *Equity Research*. Goldman Sachs Global Investment Research.

- Bellotti, F., Kapralos, B., Lee, K., Moreno-Ger, P., & Berta, R. (2013). Assessment in and of Serious Games: An Overview. *Advances in Human-Computer Interaction, 2013*, 1–11. doi :10.1155/2013/136864
- Benjamin, W. J. (2006). *Borish's Clinical Refraction*. (S.l.) : Elsevier Health Sciences. doi :10.1016/b978-0-7506-7524-6.x5001-7
- Bennett, A. G., & Rebello, N. S. (2012). Retention and Learning. Dans N. M. Seel, *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. (S.l.) : Springer, Boston, MA. doi :https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_664
- Bentivoglio, A. R., Bressman, S. B., Cassetta, E., Carretta, D., & Albanese, A. (1997). Analysis of blink rate patterns in normal subjects. *Movement Disorders, 12*(6), 1028–1034. doi :10.1002/mds.870120629
- Bernard, F., & Joule, R.-V. (2005). Le pluralisme méthodologique en sciences de l'information et de la communication a l'épreuve de la « communication engageante ». *Questions de communication, (7)*, 185–208. doi :10.4000/questionsdecommunication.4647
- Berntsen, K., Palacios, R. C., & Herranz, E. (2016). Virtual reality and its uses (pp. 435–439). Communication présentée au Proceedings of the Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality - TEEM '16, Salamanca, Spain. doi :10.1145/3012430.3012553
- Berthoz, A. (2008). *The Physiology and Phenomenology of Action* (1^{re} éd.). (S.l.) : Oxford University Press.
- Berthoz, A. (2018). Pour une fertilisation croisée des neurosciences et de l'info-com. *Hermès, 82*(3), 30–34.
- Bhavsar, P., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2018). Eye Tracking as a Tool to Enhance Operator Learning in Safety Critical Domains. Dans M. R. Eden, M. G. Ierapetritou, & G. P. Towler, (Vol. 44, pp. 2347–2352). Communication présentée au 13th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE 2018), San Diego, CA, USA. doi :10.1016/b978-0-444-64241-7.50386-4
- Biggs, A. T., Geyer, D. J., Schroeder, V. M., Robinson, F. E., & Bradley, J. L. (2018). *Adapting Virtual Reality and Augmented Reality Systems for Naval Aviation Training* (No. AD1063175). Dayton, Ohio : Naval Medical Research Unit Dayton Wright-Patterson AFB United States.
- Binaee, K., Diaz, G., Pelz, J., & Phillips, F. (2016). Binocular eye tracking calibration during a virtual ball catching task using head mounted display (pp. 15–18). Communication présentée au Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception (SAP '16), Anaheim, CA, USA. doi :10.1145/2931002.2931020
- Biocca, F., Harms, C., & Burgoon, J. K. (2003). Toward a More Robust Theory and Measure of Social Presence: Review and Suggested Criteria. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 12*(5), 456–480. doi :10.1162/105474603322761270
- Blake, R., & Wilson, H. R. (2011). Binocular vision. *Vision Research, 51*(7), 754–770. doi :https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.009

- Blandin, B. (2010). Dispositifs techniques pour l'éducation, la formation et l'apprentissage. Point de vue des industriels sur les évolutions. *Distances et Savoirs*, 8(2), 223–234. doi :10.3166/ds.8.233-234
- Blanke, O., & Metzinger, T. (2009). Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(1), 7–13. doi :10.1016/j.tics.2008.10.003
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., H., H. W., H, H. W., Hill, W. H., & Krathwohl, D. R. (1984). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals* (2nd éd.). New York, NY, USA : Addison Wesley Publishing Company. doi :10.1086/459563
- Blume, B. D., Ford, J. K., Baldwin, T. T., & Huang, J. L. (2010). Transfer of Training: A Meta-Analytic Review. *Journal of Management*, 36(4), 1065–1105. doi :10.1177/0149206309352880
- Boekaerts, M. (2016). Engagement as an inherent aspect of the learning process. *Learning and Instruction*, 43, 76–83. doi :10.1016/j.learninstruc.2016.02.001
- Boi, M., Poletti, M., Victor, J. D., & Rucci, M. (2017). Consequences of the Oculomotor Cycle for the Dynamics of Perception. *Current Biology*, 27(9), 1268–1277. doi :10.1016/j.cub.2017.03.034
- Bonenfant, M., & Genvo, S. (2014). Une approche située et critique du concept de gamification. *Sciences du jeu*, (2). doi :10.4000/sdj.286
- Bonetti, F., Warnaby, G., & Quinn, L. (2018). Augmented Reality and Virtual Reality in Physical and Online Retailing: A Review, Synthesis and Research Agenda. Dans T. Jung & M. C. T. Dieck, *Augmented Reality and Virtual Reality, Progress in IS* (pp. 119–132). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-64027-3_9
- Bonfils, P. (2014). *L'expérience communicationnelle immersive : Entre engagements, distanciations, corps et présences* (No. Thèse d'habilitation à diriger les recherches). Université Lille Nord de France, Famars, France.
- Bonfils, P. (2015). Immersion et environnements numériques : une approche méthodologique par l'expérience vécue. *Questions de communication*, 1(27), 261–277. doi :10.4000/questions-decommunication.9838
- Bonfils, P., & Renucci, F. (2008). Quelles identités partagées à l'aide d'avatars pour des apprenants au sein de mondes virtuels ? (pp. 54–72). Communication présentée au L'humain dans la formation à distance : la problématique de l'interculturel. TiceMed 2008, Sfax, Tunisia.
- Bonnac, J.-P., & Meslin, D. (2006, avril). Analyse de la vision de près: la méthode du proximètre. *Les Cahier d'Ophtalmologie*, 18–21.
- Bos, P. J., Li, L., Bryant, D., Jamali, A., & Bhowmik, A. K. (2016). 28-2:Invited Paper: Simple Method to Reduce Accommodation Fatigue in Virtual Reality and Augmented Reality Displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 47(1), 354–357. doi :10.1002/sdtp.10678
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C., & Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: a new challenge? *Virtual Reality*, 12(3), 151–161. doi :10.1007/s10055-008-0093-y

- Bosten, J. M., Goodbourn, P. T., Lawrance-Owen, A. J., Bargary, G., Hogg, R. E., & Mollon, J. D. (2015). A population study of binocular function. *Vision Research*, *110*(Part A), 34–50. doi :10.1016/j.visres.2015.02.017
- Boston, C. (2002). The Concept of Formative Assessment. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, *8*(9).
- Bostrom, N. (2003). Transhumanist Values. Dans F. Adams, *Ethical Issues for the 21st Century* (1^{re} éd.). (S.l.) : Philosophy Documentation Center.
- Bouaniche, A. A., & Leroy, L. (2016). Investigating intermittent stereoscopy: its effects on perception and visual fatigue. *Electronic Imaging*, *2016*(5), 1. doi :10.2352/issn.2470-1173.2016.5.sda-041
- Boughzala, I. (2015). A Field Application to Vet a Serious Game toward Learning Objectives. Communication présentée au 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences, Kauai, HI, USA. doi :10.1109/hicss.2015.82
- Bouvier, P., de Sorbier, F., Chaudeyrac, P., & Biri, V. (2008). Cross Benefits Between Virtual Reality And Games (pp. 1–10). Communication présentée au International Conference and Industry Symposium on Computer Games, Animation, Multimedia, IPTV, Edutainment and Security (CGAT'08), Singapore. doi :10.5176/978-981-08-8227-3_cgat08-26
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, *40*(7), 36–43. doi :10.1109/mc.2007.257
- Bowman, D. A., Sowndararajan, A., Ragan, E. D., & Kopper, R. (2009). Higher Levels of Immersion Improve Procedure Memorization Performance (pp. 121–128). Communication présentée au JVRC'09 Proceedings of the 15th Joint virtual reality Eurographics conference on Virtual Environments, Lyon, France. doi :10.2312/EGVE/JVRC09/121-128
- Boyle, E. A., Connolly, T. M., Hainey, T., & Boyle, J. M. (2012). Engagement in digital entertainment games: A systematic review. *Computers in Human Behavior*, *28*(3), 771–780. doi :10.1016/j.chb.2011.11.020
- Boyle, E. A., Hainey, T., Connolly, T. M., Gray, G., Earp, J., Ott, M., *et al.* (2016). An update to the systematic literature review of empirical evidence of the impacts and outcomes of computer games and serious games. *Computers & Education*, *94*, 178–192. doi :10.1016/j.compedu.2015.11.003
- Bracq, M.-S., Michinov, E., Arnaldi, B., Caillaud, B., Gibaud, B., Gouranton, V., & Jannin, P. (2019). Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study. *Nurse Education Today*, *79*, 153–160. doi :10.1016/j.nedt.2019.05.026
- Broad, M. L. (1997). Overview of Transfer of Training: From Learning to Performance. *Performance Improvement Quarterly*, *10*(2), 7–21. doi :10.1111/j.1937-8327.1997.tb00046.x
- Bryman, A. (1984). The Debate about Quantitative and Qualitative Research: A Question of Method or Epistemology? *The British Journal of Sociology*, *35*(1), 75–92. doi :10.2307/590553
- Bui, B., Banks, M. S., & Drettakis, G. (2017). Accommodation and comfort in head-mounted displays. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *36*(4). doi :10.1145/3072959.3073622

- Burd, H. J., Judge, S. J., & Flavell, M. J. (1999). Mechanics of accommodation of the human eye. *Vision Research*, 39(9), 1591–1595. doi :10.1016/s0042-6989(98)00298-3
- Burger, K.-P., Freiland, D. F., Piechotta, A., Schander, A., & Yntema, B. (2018). *Gaming Industry - Facts, Figures and Trends*. Clairfield International.
- Burke, L. A., & Hutchins, H. M. (2007). Training Transfer: An Integrative Literature Review. *Human Resource Development Review*, 6(3), 263–296. doi :10.1177/1534484307303035
- Burkhardt, J. M. (2007). Immersion, representation and collaboration in Virtual Reality : discussion and empirical perspectives in cognitive ergonomics. *Intellectica*, 45, 59–87. doi :10.3726/978-3-0352-0318-9/16
- Butt, A. L., Kardong-Edgren, S., & Ellertson, A. (2018). Using Game-Based Virtual Reality with Haptics for Skill Acquisition. *Clinical Simulation in Nursing*, 16, 25–32. doi :10.1016/j.ecns.2017.09.010
- Buttussi, F., & Chittaro, L. (2017). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(2), 1–14. doi :10.1109/tvcg.2017.2653117
- Caballero-Hernández, J. A., Palomo-Duarte, M., & Doderó, J. M. (2017). Skill assessment in learning experiences based on serious games: A Systematic Mapping Study. *Computers & Education*, 113, 42–60. doi :10.1016/j.compedu.2017.05.008
- Cai, T., Zhu, H., Xu, J., Wu, S., Li, X., & He, S. (2017). Human cortical neural correlates of visual fatigue during binocular depth perception: An fNIRS study. *PLoS ONE*, 12(2), e0172426. doi :10.1371/journal.pone.0172426
- Calderon, A., Ruiz, M., & Orta, E. (2017). Integrating Serious Games as Learning Resources in a Software Project Management Course: The Case of ProDec. Communication présentée au 2017 IEEE/ACM 1st International Workshop on Software Engineering Curricula for Millennials (SECM), Buenos Aires, Argentina, Argentina. doi :10.1109/secm.2017.3
- Calheiros, C. (2015). Cyberespace et attentes eschatologiques : comment les technosciences participent-elles à la croyance en une humanité spirituellement connectée ? *L'Atelier du CRH*, (15). doi :10.4000/acrh.6680
- Calvert, S. L., Appelbaum, M., Dodge, K. A., Graham, S., Hall, G. C. N., Hamby, S., et al. (2017). The American Psychological Association Task Force assessment of violent video games: Science in the service of public interest. *American Psychologist*, 72(2), 126–143. doi :10.1037/a0040413
- Campion, B., Collard, A.-S., & Fastrez, P. (2013). Apports et limites de l'expérimentation comme moyen d'investigation des effets éducatifs des médias. *ESSACHESS: Journal for Communication Studies*, 6(1(11)).
- Cao, T., Wan, F., Wong, C., da Cruz, J., & Hu, Y. (2014). Objective evaluation of fatigue by EEG spectral analysis in steady-state visual evoked potential-based brain-computer interfaces. *BioMedical Engineering OnLine*, 13(1), 1–28. doi :10.1186/1475-925x-13-28

- Cardin, V. (2011). Sensitivity of human visual cortical area V6 to stereoscopic depth gradients associated with self-motion. *Journal of Neurophysiology*, *106*(3), 1240–1249. doi :10.1152/jn.01120.2010
- Carl, E., Stein, A. T., Levihn-Coon, A., Pogue, J. R., Rothbaum, B., Emmelkamp, P., *et al.* (2019). Virtual reality exposure therapy for anxiety and related disorders: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Anxiety Disorders*, *61*(08), 27–36. doi :10.1016/j.janxdis.2018.08.003
- Carnegie, K., & Rhee, T. (2015). Reducing Visual Discomfort with HMDs Using Dynamic Depth of Field. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *35*(5), 34–41. doi :10.1109/MCG.2015.98
- Chambers, A. M. (2017). The role of sleep in cognitive processing: focusing on memory consolidation. *WIREs Cognitive Science*, *8*(3), e1433. doi :10.1002/wcs.1433
- Chan, E., Foster, S., Sambell, R., & Leong, P. (2018). Clinical efficacy of virtual reality for acute procedural pain management: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE*, *13*(7), e0200987. doi :10.1371/journal.pone.0200987
- Chao, C.-J., Wu, S.-Y., Yau, Y.-J., Feng, W.-Y., & Tseng, F.-Y. (2017). Effects of three-dimensional virtual reality and traditional training methods on mental workload and training performance. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *27*(4), 187–196. doi :10.1002/hfm.20702
- Chao, C.-J., Yau, Y.-J., Lin, C.-H., & Feng, W.-Y. (2019). Effects of display technologies on operation performances and visual fatigue. *Displays*, *57*, 34–46. doi :10.1016/j.displa.2019.03.003
- Chapanis, A., & McCleary, R. A. (1953). Interposition as a Cue for the Perception of Relative Distance. *The Journal of General Psychology*, *48*(2), 113–132. doi :10.1080/00221309.1953.9920186
- Charman, W. N. (2008). The eye in focus: accommodation and presbyopia. *Clinical and Experimental Optometry*, *91*(3), 207–225. doi :10.1111/j.1444-0938.2008.00256.x
- Charsky, D. (2010). From Edutainment to Serious Games: A Change in the Use of Game Characteristics. *Games and Culture*, *5*(2), 177–198. doi :10.1177/1555412009354727
- Chen, C., Wang, J., Li, K., Liu, Y., & Chen, X. (2015). Visual fatigue caused by watching 3DTV: an fMRI study. *BioMedical Engineering OnLine*. doi :10.1186/1475-925x-14-s1-s12
- Chen, C., Wang, J., Liu, Y., & Chen, X. (2017a). Using Bold-fMRI to detect cortical areas and visual fatigue related to stereoscopic vision. *Displays*, *50*, 14–20. doi :10.1016/j.displa.2017.09.003
- Chen, M., Gaither, K., John, N. W., & Mccann, B. (2019). An Information-Theoretic Approach to the Cost-benefit Analysis of Visualization in Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *25*(1), 32–42. doi :10.1109/tvcg.2018.2865025
- Chen, M.-H., Tseng, W.-T., & Hsiao, T.-Y. (2018). The effectiveness of digital game-based vocabulary learning: A framework-based view of meta-analysis. *British Journal of Educational Technology*, *49*(1), 69–77. doi :10.1111/bjet.12526

- Chen, S., & Epps, J. (2014). Using Task-Induced Pupil Diameter and Blink Rate to Infer Cognitive Load. *Human-Computer Interaction*, 29(4), 390–413. doi :10.1080/07370024.2014.892428
- Chen, Y.-C., Lewis, T. L., Shore, D. I., & Maurer, D. (2017b). Early Binocular Input Is Critical for Development of Audiovisual but Not Visuotactile Simultaneity Perception. *Current Biology*, 27(4), 583–589. doi :10.1016/j.cub.2017.01.009
- Chen, Y.-F., Lee, Y.-Y., Chen, T., Semmlow, J. L., & Alvarez, T. L. (2010). Review: Behaviors, Models, and Clinical Applications of Vergence Eye Movements. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 30(1), 1–15.
- Chislenko, A. S. (2013). Intelligent Information Filters and Enhanced Reality. Dans M. More & N. Vita-More, *The Transhumanist Reader: Classical and Contemporary Essays on the Science, Technology, and Philosophy of the Human Future* (1^{re} éd., pp. 138–145). (S.l.) : Wiley-Blackwell.
- Chittaro, L. (2016). Designing Serious Games for Safety Education: «Learn to Brace versus Traditional Pictorials for Aircraft Passengers. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(5), 1527–1539. doi :10.1109/tvcg.2015.2443787
- Chittaro, L., & Buttussi, F. (2015). Assessing Knowledge Retention of an Immersive Serious Game vs. a Traditional Education Method in Aviation Safety. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(4), 529–538. doi :10.1109/tvcg.2015.2391853
- Cho, S.-H., & Kang, H.-B. (2012). The measurement of eyestrain caused from diverse binocular disparities, viewing time and display sizes in watching stereoscopic 3D content (pp. 23–28). Communication présentée au 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Providence, RI, USA. doi :10.1109/cvprw.2012.6238904
- Cho, T.-H., Chen, C.-Y., Wu, P.-J., Chen, K.-S., & Yin, L.-T. (2017). The comparison of accommodative response and ocular movements in viewing 3D and 2D displays. *Displays*, 49, 59–64. doi :10.1016/j.displa.2017.07.002
- Chollet, A. (2019). Différence entre jeu vidéo, serious game, serious-gaming et ludification : proposition d'une typologie des usages managériaux des technologies et pratiques ludiques. Communication présentée au 24^{ème} Colloque AIM : Association Information et Management, Nantes, France.
- Chu, G., Humer, I., & Eckhardt, C. (2019). Special Relativity in Immersive Learning. Dans *Immersive Learning Research Network. iLRN 2019. Communications in Computer and Information Science*, 1044 (pp. 16–29). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-23089-0_2
- Chun, M. M., & Turk-Browne, N. B. (2007). Interactions between attention and memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(2), 177. doi :10.1016/j.conb.2007.03.005
- Ciborra, C. (2007). Digital technologies and risk: a critical review. Dans O. Hanseth & C. Ciborra, *Risk, Complexity and ICT* (1^{re} éd., pp. 23–45). Cheltenham, UK : Edward Elgar.
- Clark, D. B., Tanner-Smith, E. E., & Killingsworth, S. S. (2016). Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, 86(1), 79–122. doi :10.3102/0034654315582065

- Classen, C. (1997). Foundations for an anthropology of the senses. *International Social Science Journal*, 49(153), 401–412. doi:10.1111/j.1468-2451.1997.tb00032.x
- Clay, V., König, P., & König, S. U. (2019). Eye tracking in Virtual Reality. *Journal of Eye Movement Research*, 12(1). doi :https://doi.org/10.16910/jemr.12.1.3
- Cobb, S. V. G., Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 169–186. doi :10.1162/105474699566152
- Coles-Brennan, C., Sulley, A., & Young, G. (2019). Management of digital eye strain. *Clinical and Experimental Optometry*, 102(1), 18–29. doi :10.1111/cxo.12798
- Collectif. (2018). *Dynamiques des recherches en sciences de l'information et de la communication*. (S.l.) : Conférence permanente des directeurs·rices des unités de recherche en sciences de l'information et de la communication.
- Connolly, T. M., Boyle, E. A., MacArthur, E., Hainey, T., & Boyle, J. M. (2012). A systematic literature review of empirical evidence on computer games and serious games. *Computers & Education*, 59(2), 661–686. doi :10.1016/j.compedu.2012.03.004
- Conti, J., Ozell, B., Paquette, E., & Renaud, P. (2017). Adjusting stereoscopic parameters by evaluating the point of regard in a virtual environment. *Computers & Graphics*, 69, 24–35. doi :10.1016/j.cag.2017.08.017
- Corneloup, V., Garbay, C., Bourrier, Y., Jambon, F., Luengo, V., Job, A., et al. (2016). Simulation and virtual reality-based learning of non-technical skills in driving: critical situations, diagnostic and adaptation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(32), 66–71. doi :10.1016/j.ifacol.2016.12.191
- Costello, P. J. (1997). *Health and Safety Issues associated with Virtual Reality-A Review of Current Literature* (No. 37). Loughborough, UK : Loughborough : Advisory Group on Computer Graphics.
- Courbet, D. (2013). Pour un développement raisonné des méthodes expérimentales en SIC. Quelques intérêts épistémologiques du pluralisme méthodologique. *ESSACHESS: Journal for Communication Studies*, 6(1(11)), 15–34.
- Cowan, N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory? Dans S. B. Dunnett & A. Björklund, *Progress in Brain Research*, 169 (pp. 323–338). (S.l.) : Academic Press Elsevier. doi :10.1016/s0079-6123(07)00020-9
- Crevoisier, M. (2019). La nouveauté de l'image vidéoludique. *Sciences du jeu*, (11). doi :10.4000/sdj.1845
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., & DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '93*, 135–142. doi :10.1145/166117.166134
- Csikszentmihalyi, M. (2008). *Flow: The Psychology of Optimal Experience* (1^{re} éd.). New York, NY, USA : Harper Perennial Modern Classics.

- Csikzentmihalyi, M. (1990). *Flow, the psychology of optimal experience*. Harper Collins. New York, USA : Harper & Row. doi :10.5860/choice.28-0597
- Cummings, J. J., & Bailenson, J. N. (2015). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2), 272–309. doi :10.1080/15213269.2015.1015740
- Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29(1), 27–36. doi :10.3758/BF03200563
- Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: the integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. Dans W. Epstein & S. Rogers, *Handbook of perception and cognition* (2nd éd., pp. 69–117). San Diego, CA, USA : Academic Press. doi :10.1016/B978-012240530-3/50005-5
- Dacos, M. (2011, 26 mars). Manifeste des Digital humanities. *tcp.hypotheses.org*. Paris, France. doi :10.4000/books.oep.235
- Dalrymple, K. A., Manner, M. D., Harmelink, K. A., Teska, E. P., & Elison, J. T. (2018). An Examination of Recording Accuracy and Precision From Eye Tracking Data From Toddlerhood to Adulthood. *Frontiers in Psychology*, 9. doi :10.3389/fpsyg.2018.00803
- Damasio, A. (2019). *Les Furtifs*. (S.l.) : La Volte.
- Dan, A., & Reiner, M. (2016). EEG-based cognitive load of processing events in 3D virtual worlds is lower than processing events in 2D displays. *International Journal of Psychophysiology*. doi :10.1016/j.ijpsycho.2016.08.013
- Daniel, F., & Kapoula, Z. (2019). Induced vergence-accommodation conflict reduces cognitive performance in the Stroop test. *Scientific Reports*, 9(1). doi :10.1038/s41598-018-37778-y
- Daniel, M., & Garry, C. (2018). *Video Games As Culture*. *Video Games As Culture*. London, UK : Routledge. doi :10.4324/9781315622743
- Davidson, J., Fowler, J., Pantazis, C., Sannino, M., Walker, J., Sheikhhoshkar, M., & Rahimian, F. P. (2019). Integration of VR with BIM to facilitate real-time creation of bill of quantities during the design phase: a proof of concept study. *Frontiers of Engineering Management*, 1(2), 1–8. doi :https://doi.org/10.1007/s42524-019-0039-y
- Davis, S., Nesbitt, K., & Nalivaiko, E. (2014). A Systematic Review of Cybersickness (pp. 1–9). Communication présentée au Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment - IE2014, Newcastle, NSW, Australia. doi :10.1145/2677758.2677780
- De Gloria, A., Bellotti, F., & Berta, R. (2014). Serious Games for education and training. *International Journal of Serious Game*, 1(1). doi :10.17083/ijsg.v1i1.11
- De Houwer, J., Barnes-Holmes, D., & Moors, A. (2013). What is learning? On the nature and merits of a functional definition of learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(4), 631–642. doi :10.3758/s13423-013-0386-3
- De Lope, R. P., & Medina, N. M. (2016). A Comprehensive Taxonomy for Serious Games. *Journal of Educational Computing Research*. doi :10.1177/0735633116681301

- Deary, I. J., Liewald, D., & Nissan, J. (2011). A free, easy-to-use, computer-based simple and four-choice reaction time programme: The Deary-Liewald reaction time task. *Behavior Research Methods*, 43(1), 258–268. doi :10.3758/s13428-010-0024-1
- Dede, C., Salzman, M. C., & Loftin, R. B. (1996). ScienceSpace: virtual realities for learning complex and abstract scientific concepts. Communication présentée au Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. doi :10.1109/vrais.1996.490534
- Dehaene, S. (2012, 20 novembre). Les grands principes de l'apprentissage. *www.college-de-france.fr*. [En ligne] Consulté le : 03/05/2017. Disponible sur : <https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/symposium-2012-11-20-10h00.htm>
- Dehaene, S. (2013, 7 novembre). Did neuroscience find the secret of learning? *www.parisinnovationreview.com*. [En ligne] Consulté le : 12/04/2017. Disponible sur : <http://parisinnovationreview.com/articles-en/did-neuroscience-find-the-secrets-of-learning>
- Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines*. Paris : Odile Jacob.
- Delors, J., Mufti, A. I., Amagi, I., Carneiro, R., Chung, F., Geremek, B., et al. (1996). *Learning: The Treasure within. International Commission on Education for the twenty-first-Century*. Paris, France : UNESCO Publishing. doi :10.7788/ijbe.1996.24.1.253
- Department, S. R. (2014, 14 juillet). Global revenue from sales of virtual reality head-mounted display sales 2015-2018. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/426496/virtual-reality-hmds-sales-revenue-worldwide/>
- Department, S. R. (2016a, 8 mars). Global virtual reality video gaming revenue 2015-2020. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/499714/global-virtual-reality-gaming-sales-revenue/>
- Department, S. R. (2016b, 8 mars). Global virtual reality video gaming revenue 2015-2020, by segment. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/538801/global-virtual-reality-gaming-sales-revenue-segment/>
- Devisme, C. (2008). *Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique*. Thèse de Doctorat. Université Paris IV - Pierre et Marie Curie.
- Diaz, G., Cooper, J., Rothkopf, C., & Hayhoe, M. (2013). Saccades to future ball location reveal memory-based prediction in a virtual-reality interception task. *Journal of Vision*, 13(1)(20), 13. doi :10.1167/13.1.20
- Divjak, M., & Bischof, H. (2009). Eye blink based fatigue detection for prevention of Computer Vision Syndrome (pp. 350–353). Communication présentée au Proceedings of IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA), Yokohama, Japan.
- Djaouti, D., Alvarez, J., & Jessel, J.-P. (2011a). Classifying Serious Games: The G/P/S Model. Dans P. Felicia, *Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games* (pp. 118–136). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-60960-495-0.ch006

- Djaouti, D., Alvarez, J., Jessel, J.-P., & Rampnoux, O. (2011b). Origins of Serious Games. Dans *Serious Games and Edutainment Applications* (pp. 25–43). (S.l.): Springer London. doi :10.1007/978-1-4471-2161-9_3
- Dodgson, N. A. (2004). Variation and extrema of human interpupillary distance. Dans M. T. Bolas, A. J. Woods, J. O. Merritt, & S. A. Benton, (Vol. 5291). Communication présentée au Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, San Jose, CA, USA. doi :10.1117/12.529999
- Dreimane, S. (2019). Gamification for Education: Review of Current Publications. Dans L. Daniela, *Didactics of Smart Pedagogy* (pp. 453–464). (S.l.): Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-01551-0_23
- Duchowski, A. T. (2017). *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice* (3rd éd.). (S.l.) : Springer.
- Duchowski, A. T., House, D. H., Gestring, J., Wang, R. I., Krejtz, K., Krejtz, I., *et al.* (2014). Reducing visual discomfort of 3D stereoscopic displays with gaze-contingent depth-of-field (pp. 39–46). Communication présentée au Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception - SAP '14. doi :10.1145/2628257.2628259
- Duchowski, A. T., Krejtz, K., Krejtz, I., Biele, C., Niedzielska, A., Kiefer, P., *et al.* (2018). The Index of Pupillary Activity: Measuring Cognitive Load vis-à-vis Task Difficulty with Pupil Oscillation. Communication présentée au Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), Montreal QC, Canada. doi :10.1145/3173574.3173856
- Duncan, I., Miller, A., & Jiang, S. (2012). A taxonomy of virtual worlds usage in education. *British Journal of Educational Technology*, 43(6), 949–964. doi :10.1111/j.1467-8535.2011.01263.x
- Durscher, R., Pankonien, A. M., & Bhagat, N. (2019). AArDVARK: Aerospace Analysis and Design in Virtual and Augmented Reality toolKit. Communication présentée au AIAA Aviation 2019 Forum, Dallas, TX, USA. doi :10.2514/6.2019-3560
- Döring, S., & Feger, F. (2010). Risk Assessment as Virtue. Dans S. Roeser, *Emotions and Risky Technologies*, 5 (pp. 91–106). (S.l.) : Springer. doi :10.1007/978-90-481-8647-1_6
- Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., & Wiemeyer, J. (2016). *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice*. (S.l.) : Springer International Publishing.
- Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Singley, A. T. M., & Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25(2), 69–91. doi :10.1016/j.dcn.2016.11.001
- Egenfeldt-Nielsen, S. (2006). Overview of research on the educational use of video games. *Digital kompetanse*, 1(3), 184–213.
- Egenfeldt-Nielsen, S., Smith, J. H., & Tosca, S. P. (2016). *Understanding video games: The essential introduction* (3rd éd.). New York, NY, USA : Routledge. doi :10.4324/9780203116777

- Ekstrand, C., Jamal, A., Nguyen, R., Kudryk, A., Mann, J., & Mendez, I. (2018). Immersive and interactive virtual reality to improve learning and retention of neuroanatomy in medical students: a randomized controlled study. *CMAJ Open*, 6(1), E103–E109. doi :10.9778/cmajo.20170110
- Elfert, M. (2015). UNESCO, the Faure Report, the Delors Report, and the Political Utopia of Lifelong Learning. *European Journal of Education*, 50(1), 88–100. doi :10.1111/ejed.12104
- Ellis, S. R. (2016, 22 décembre). Development and History of Head-Mounted Displays and Viewers for Virtual Environments or Augmented Reality. *www.humansystems.arc.nasa.gov*.
- Emoto, M., Niida, T., & Okano, F. (2005). Repeated Vergence Adaptation Causes the Decline of Visual Functions in Watching Stereoscopic Television. *Journal of Display Technology*, 1(2), 328–340. doi :10.1109/jdt.2005.858938
- Engeser, S., & Rheinberg, F. (2008). Flow, performance and moderators of challenge-skill balance. *Motivation and Emotion*, 32(3), 158–172. doi :10.1007/s11031-008-9102-4
- Erenli, K. (2012). The impact of gamification: A recommendation of scenarios for education (pp. 1–8). Communication présentée au 2012 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL). doi :10.1109/icl.2012.6402106
- Erkelens, I. M., & Bobier, W. R. (2017). Asymmetries between convergence and divergence reveal tonic vergence is dependent upon phasic vergence function. *Journal of Vision*, 17(5), 1–16. doi :10.1167/17.5.4
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429–433. doi :10.1038/415429a
- Evans, B. J. W. (2007). Detecting binocular vision anomalies in primary eyecare practice. Dans *Pickwell's Binocular Vision Anomalies* (5^e éd., pp. 12–38). (S.l.) : Butterworth-Heinemann. doi :https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8897-0.X5001-X
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Lovreglio, R., & Cabrera-Guerrero, G. (2018). Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. *Computers & Education*, 127, 252–266. doi :10.1016/j.compedu.2018.09.002
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Sacks, R., *et al.* (2019). An Immersive Virtual Reality Serious Game to Enhance Earthquake Behavioral Responses and Post-earthquake Evacuation Preparedness in Buildings. *arXiv e-prints*, (1905.11082).
- Fergo, C., Burcharth, J., Pommergaard, H.-C., Kildebro, N., & Rosenberg, J. (2017). Three-dimensional laparoscopy vs 2-dimensional laparoscopy with high-definition technology for abdominal surgery: a systematic review. *The American Journal of Surgery*, 213(1), 159–170. doi :10.1016/j.amjsurg.2016.07.030
- Ferguson, C. J., Coulson, M., & Barnett, J. (2011). A meta-analysis of pathological gaming prevalence and comorbidity with mental health, academic and social problems. *Journal of Psychiatric Research*, 45(12), 1573–1578. doi :10.1016/j.jpsychires.2011.09.005
- Fichez, E. (2001). *Construction sociale de l'univers des jeux vidéo*. Thèse de Doctorat. Ville-neuve d'Ascq, France : Université Charles-de-Gaulle.

- Fodor, L. A., Coteș, C. D., Cuijpers, P., Szamoskozi, Ș., David, D., & Cristea, I. A. (2018). The effectiveness of virtual reality based interventions for symptoms of anxiety and depression: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 8(1). doi :10.1038/s41598-018-28113-6
- Foley, J. D. (1987). Interfaces for Advanced Computing. *Scientific American*, 257(4), 126–135. doi :10.1038/scientificamerican1087-126
- Fortuin, M. F., Lambooi, M. T., IJsselsteijn, W. A., Heynderickx, I., Edgar, D. F., & Evans, B. J. (2010). An exploration of the initial effects of stereoscopic displays on optometric parameters. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31(1), 33–44. doi :10.1111/j.1475-1313.2010.00804.x
- Fourquet-Courbet, M.-P., & Courbet, D. (2015). Les serious games, dispositifs de communication persuasive. *Réseaux*, 6(194), 199–228. doi :10.3917/res.194.0199
- Fredricks, J. A., & McColskey, W. (2012). The Measurement of Student Engagement: A Comparative Analysis of Various Methods and Student Self-report Instruments. Dans S. L. Christenson, A. L. Reschly, & C. Wylie, *Handbook of Research on Student Engagement* (pp. 763–782). (S.l.) : Springer US. doi :10.1007/978-1-4614-2018-7_37
- Freeman, J., Avons, S. E., Pearson, D. E., & IJsselsteijn, W. A. (1999). Effects of Sensory Information and Prior Experience on Direct Subjective Ratings of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1), 1–13. doi :10.1162/105474699566017
- Freina, L., & Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education- state of the art and perspectives. Communication présentée au eLearning and Software for Education (eLSE), Bucharest, Romania.
- Fuchs, P. (2016). *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo* (1^{re} éd.). Paris, France : Presses des MINES.
- Fuchs, P. (2018). The Challenges and Risks of Democratization of VR-AR. Dans B. Arnaldi, P. Guitton, & G. Moreau, *Virtual Reality and Augmented Reality: Myths and Realities*.
- Fuchs, P., Arnaldi, B., & Tisseau, J. (2006). Les concepts de base de la réalité virtuelle. Dans *Traité de la réalité virtuelle volume 1*. Paris, France : Presses de l'Ecole des Mines.
- Fujikake, K., Omori, M., Hasegawa, S., Takada, H., Tahara, H., & Miyao, M. (2014). Stereoscopic Displays and Accommodative Focus. *Forma*, 29(Special Issue), S53–S63. doi :10.5047/forma.2014.s008
- Furness, T. A. (1986). The Super Cockpit and its Human Factors Challenges. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 30(1), 48–52. doi :10.1177/154193128603000112
- Gabana, D., Tokarchuk, L., Hannon, E., & Gunes, H. (2017). Effects of valence and arousal on working memory performance in virtual reality gaming. Communication présentée au 2017 Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), San Antonio, TX, USA. doi :10.1109/acii.2017.8273576
- Gaggioli, A., Bassi, M., & Delle-Fave, A. (2003). Quality of Experience in Virtual Environments. Dans G. Riva, F. Davide, & W. A. IJsselsteijn, *Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments* (1^{re} éd.). Amsterdam, The Netherlands : IOS Press.

- Gallear, W., Lameris, P., & Stewart, C. (2014). Serendipitous learning & serious games: A Pilot Study. Communication présentée au 2014 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL2014), Thessaloniki, Greece. doi :10.1109/imctl.2014.7011141
- Gao, X., Pan, W., Li, C., Weng, L., Yao, M., & Chen, A. (2017). Long-Time Exposure to Violent Video Games Does Not Show Desensitization on Empathy for Pain: An fMRI Study. *Frontiers in Psychology*, 8. doi :10.3389/fpsyg.2017.00650
- Garris, R., Ahlers, R., & Driskell, J. E. (2002). Games, Motivation, and Learning: A Research and Practice Model. *Simulation & Gaming*, 33(4), 441–467. doi :10.1177/1046878102238607
- Gauthier, G. M., Nommay, D., & Vercher, J.-L. (1990). The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science*, 249(4964), 58–61. doi :10.1126/science.2367852
- Gebrehiwot, T., Paprocki, R., & Lenskiy, A. (2016). Analysis of Blink Rate Variability during reading and memory testing. *arXiv:1603.04173*.
- Gee, J. P. (2008). Learning Theory, Video Games, and Popular Culture. Dans K. Drotner & S. Livingstone, *The International Handbook of Children, Media and Culture* (pp. 196–212). London, UK : SAGE Publications Ltd. doi :10.4135/9781848608436.n13
- Geoghegan, B., & Peters, B. (2016). Cybernetics. Dans K. B. Jensen, R. T. Craig, J. D. Pooley, & E. W. Rothenbuhler, *The International Encyclopedia of Communication Theory and Philosophy*. (S.l.) : JohnWiley & Sons, Inc. doi :10.1002/9781118766804.wbiect041
- Geraci, R. M. (2012). Video Games and the Transhuman Inclination. *Zygon*, 47(4), 735–756. doi :10.1111/j.1467-9744.2012.01292.x
- Gerbier, E., & Toppino, T. C. (2015). The effect of distributed practice: Neuroscience, cognition, and education. *Trends in Neuroscience and Education*, 4(3), 49–59. doi :10.1016/j.tine.2015.01.001
- Gibaldi, A., & Banks, M. S. (2019). Binocular Eye Movements Are Adapted to the Natural Environment. *The Journal of Neuroscience*, 39(15), 2877–2888. doi :10.1523/jneurosci.2591-18.2018
- Giessen, H. W. (2015). Serious Games Effects: An Overview. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 174, 2240–2244. doi :10.1016/j.sbspro.2015.01.881
- Gigante, M. A. (1993). Virtual Reality: Definitions, History and Applications. Dans R. A. Earnshaw & H. Jones, *Virtual Reality Systems* (pp. 3–14). (S.l.) : Academic Press. doi :10.1016/b978-0-12-227748-1.50009-3
- Girard, C., Ecalle, J., & Magnan, A. (2013). Serious games as new educational tools: how effective are they? A meta-analysis of recent studies. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29(3), 207–219. doi :10.1111/j.1365-2729.2012.00489.x
- Glasser, A. (2006). Accommodation: Mechanism and Measurement. *Ophthalmology Clinics*, 19(1), 1–12. doi :http://dx.doi.org/10.1016/j.ohc.2005.09.004
- Goldberg, J. H., & Wichansky, A. M. (2003). Eye Tracking in Usability Evaluation: A Practitioner's Guide. Dans J. Hyönä, R. Radach, & H. Deubel, *The Mind's Eye: Cognitive and Applied*

Aspects of Eye Movement Research (pp. 493–516). Oxford, UK : Elsevier Science. doi :10.1016/b978-044451020-4/50027-x

Goldinger, S. D., Papesh, M. H., Barnhart, A. S., Hansen, W. A., & Hout, M. C. (2016). The poverty of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 959–978. doi :10.3758/s13423-015-0860-1

Goldstein, E. B., & Brockmole, J. R. (2016). *Sensation and Perception* (10^e éd.). (S.I.) : Wadsworth Publishing.

Gonzaga, L., RobertoVeronez, M., Kannenberg, G. L., Alves, D. N., Cazarin, C. L., Santana, L. G., *et al.* (2018). Immersive Virtual Fieldwork: Advances for the Petroleum Industry (pp. 561–562). Communication présentée au 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Reutlingen, Germany. doi :10.1109/vr.2018.8446511

Gonzalez, D. O., Martin-Gorriz, B., Berrocal, I. I., Morales, A. M., Salcedo, G. A., & Hernandez, B. M. (2017). Development and assessment of a tractor driving simulator with immersive virtual reality for training to avoid occupational hazards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 111–118. doi :10.1016/j.compag.2017.10.008

Gorbanev, I., Agudelo-Londoño, S., González, R. A., Cortes, A., Pomares, A., Delgadillo, V., *et al.* (2018). A systematic review of serious games in medical education: quality of evidence and pedagogical strategy. *Medical Education Online*, 23(1), 1438718. doi :10.1080/10872981.2018.1438718

Gordon, C. L., Shea, T. M., Noelle, D. C., & Balasubramaniam, R. (2019). Affordance Compatibility Effect for Word Learning in Virtual Reality. *Cognitive Science*, 43(e12742). doi :10.1111/cogs.12742

Gorisse, G. (2019). *Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel* (No. 2019ENAM0004). École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Laval, France.

Gough, C. (2019a). Gaming market value worldwide 2012-2021. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 14/03/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/292056/video-game-market-value-worldwide/>

Gough, C. (2019b). Revenue of the global eSports market 2012-2022. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 14/03/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/490522/global-esports-market-revenue/>

Grill-Spector, K., & Malach, R. (2004). The human visual cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 27(1), 649–677. doi :10.1146/annurev.neuro.27.070203.144220

Groves, C. L., Blanco-Herrera, J. A., Prot, S., Berch, O. N., McCowen, S., & Gentile, D. A. (2015). What is Known About Video Game and Internet Addiction After DSM-5. Dans *The Wiley Handbook of Psychology, Technology, and Society* (pp. 502–513). doi :10.1002/9781118771952.ch29

Grumbach, A., & Klinger, E. (2007). Virtuel et Cognition - Introduction au dossier. *Intellectica*, 45(1), 7–22.

- Guan, P., & Banks, M. S. (2016). Stereoscopic depth constancy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 371(1697). doi :10.1098/rstb.2015.0253
- Guo, J., Weng, D., Duh, H. B.-L., Liu, Y., & Wang, Y. (2017). Effects of using HMDs on visual fatigue in virtual environments. Communication présentée au 2017 IEEE Virtual Reality (VR), Los Angeles, CA, USA. doi :10.1109/vr.2017.7892270
- Guo, J., Weng, D., Zhang, Z., Liu, Y., & Wang, Y. (2019). Subjective and objective evaluation of visual fatigue caused by continuous and discontinuous use of HMDs. *Journal of the Society for Information Display*, 27(2), 108–119. doi :10.1002/jsid.750
- Haggis, M., Perrotta, C., Persico, D., Bailey, C., Earp, J., Dagnino, F., *et al.* (2018). A Manifesto for European Video Games. Dans *Gaming Horizons Deliverable D 3.4. In Gaming horizons : alternative framings for a new role of gaming in education and society : deliverables: Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement No 732332)*. Rome, Italy : CNR Edizioni.
- Hamacher, A., Kwon, S. C., & Whangbo, T.-K. (2016). Analysis of depth perception in smart phone HMDs. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10(1), 126–134.
- Hamari, J., & Koivisto, J. (2014). Measuring flow in gamification: Dispositional Flow Scale-2. *Computers in Human Behavior*, 40, 133–143. doi :10.1016/j.chb.2014.07.048
- Hamari, J., Shernoff, D. J., Rowe, E., Coller, B., Asbell-Clarke, J., & Edwards, T. (2016). Challenging games help students learn: An empirical study on engagement, flow and immersion in game-based learning. *Computers in Human Behavior*, 54, 170–179. doi :10.1016/j.chb.2015.07.045
- Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J., & Liu, Y. (2016). Assessing proprioception: A critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 80–90. doi :10.1016/j.jshs.2014.10.004
- Harley, D. (2019). Palmer Luckey and the rise of contemporary virtual reality. *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies*, 110(10). doi :10.1177/1354856519860237
- Harman, J., Brown, R., & Johnson, D. (2017). Improved Memory Elicitation in Virtual Reality: New Experimental Results and Insights. Dans R. Bernhaupt, G. Dalvi, A. Joshi, D. K. Balkrishan, J. O'Neill, & M. Winckler, *Human-Computer Interaction - INTERACT 2017. INTERACT 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10514 (pp. 128–46). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-67684-5_9
- Harvey, C., Selmanović, E., O'Connor, J., & Chahin, M. (2019). A comparison between expert and beginner learning for motor skill development in a virtual reality serious game. *The Visual Computer*, 1–15. doi :10.1007/s00371-019-01702-w
- Hashemi, H., Nabovati, P., Khabazkhoob, M., Yekta, A., Emamian, M. H., & Fotouhi, A. (2017). Does Hofstetter's equation predict the real amplitude of accommodation in children? *Clinical and Experimental Optometry*, 101(1), 123–128. doi :10.1111/cxo.12550

- Hashemi, H., Nabovati, P., Yekta, A. A., Ostadimoghaddam, H., Forouzesh, S., Yazdani, N., & Khabazkhoob, M. (2016). Amplitude of accommodation in an 11- to 17-year-old Iranian population. *Clinical and Experimental Optometry*, *100*(2), 162–166. doi :10.1111/cxo.12431
- Heer, R. (2012). Revised Bloom's Taxonomy. (R. Heer, Éd.). *www.celt.iastate.edu*. [En ligne] Consulté le : 27/04/2017. Disponible sur : <http://www.celt.iastate.edu/teaching/effective-teaching-practices/revised-blooms-taxonomy/>
- Heilig, M. L. (1960, 4 octobre). Stereoscopic-television apparatus for individual use. *US2955156M*. USA.
- Heim, M. (1994). *The Metaphysics of Virtual Reality*. New York, NY, USA : Oxford University Press.
- Henrie, C. R., Halverson, L. R., & Graham, C. R. (2015). Measuring student engagement in technology-mediated learning: A review. *Computers & Education*, *90*, 36–53. doi :10.1016/j.compedu.2015.09.005
- Heo, J.-Y., Kim, K., Fava, M., Mischoulon, D., Papakostas, G. I., Kim, M.-J., *et al.* (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. doi :10.1016/j.jpsychires.2016.12.010
- Heron, G., Charman, W. N., & Schor, C. M. (2001). Age Changes in the Interactions between the Accommodation and Vergence Systems. *Optometry and Vision Science*, *78*(10), 754–762. doi :10.1097/00006324-200110000-00015
- Herz, M., & Rauschnabel, P. A. (2019). Understanding the diffusion of virtual reality glasses: The role of media, fashion and technology. *Technological Forecasting and Social Change*, *138*, 228–242. doi :10.1016/j.techfore.2018.09.008
- Hess, R. F., To, L., Zhou, J., Wang, G., & Cooperstock, J. R. (2015). Stereo Vision: The Haves and Have-Nots. *i-Perception*, *6*(3), 204166951559302. doi :10.1177/2041669515593028
- Hirota, M., Kanda, H., Endo, T., Miyoshi, T., Miyagawa, S., Hirohara, Y., *et al.* (2019). Comparison of Visual Fatigue caused by Head-Mounted Display for Virtual Reality and Two-Dimensional Display using Objective and Subjective Evaluation. *Ergonomics*, 1–33. doi :10.1080/00140139.2019.1582805
- Hodges, L. F., & Davis, E. T. (1993). Geometric Considerations for Stereoscopic Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *2*(1), 34–43. doi :10.1162/pres.1993.2.1.34
- Hoffing, R. C., & Seitz, A. (2016). Pupil size as an indicator of neurochemical activity during learning (pp. 341–342). Communication présentée au Proceedings of the Ninth Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '16), Charleston, SC, USA. doi :10.1145/2857491.2888586
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, *8*(3:33), 1–30. doi :10.1167/8.3.33

- Holliman, N. S., Dodgson, N. A., Favalora, G. E., & Pockett, L. (2011). Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis. *IEEE Transactions on Broadcasting*, *57*(2), 362–371. doi :10.1109/tbc.2011.2130930
- Hopstaken, J. F., van der Linden, D., Bakker, A. B., Kompier, M. A. J., & Leung, Y. K. (2016). Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *42*(6), 878–889. doi :10.1037/xhp0000189
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (1996). *Binocular Vision and Stereopsis*. New York, NY, USA : Oxford University Press. doi :10.1093/acprof:oso/9780195084764.001.0001
- Howard, M. C. (2019). Virtual Reality Interventions for Personal Development: A Meta-Analysis of Hardware and Software. *Human-Computer Interaction*, *34*(3), 205–239. doi :10.1080/07370024.2018.1469408
- Huang, H.-M., Rauch, U., & Liaw, S.-S. (2010). Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach. *Computers & Education*, *55*(3), 1171–1182. doi :10.1016/j.compedu.2010.05.014
- Huber, T., Wunderling, T., Paschold, M., Lang, H., Kneist, W., & Hansen, C. (2018). Highly immersive virtual reality laparoscopy simulation: development and future aspects. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, *13*(2), 281–290. doi :10.1007/s11548-017-1686-2
- Hughes, D., Waddingham, E., Mt-Isa, S., Goginsky, A., Chan, E., Juhaeri, J., et al. (2016). Recommendations for benefit–risk assessment methodologies and visual representations. *Pharmacoepidemiology and Drug Safety*, *25*(3), 251–262. doi :10.1002/pds.3958
- Hupont, I., Gracia, J., Sanagustin, L., & Gracia, M. A. (2015). How do new visual immersive systems influence gaming QoE? A use case of serious gaming with Oculus Rift (pp. 1–6). Communication présentée au 2015 Seventh International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Costa Navarino, Messina, Greece. doi :10.1109/qomex.2015.7148110
- Höfler, C., Gremsl, A., & Schienle, A. (2018). Nocebo and pseudo-neglect: Paradoxical effects detected with eye-tracking. *International Journal of Psychophysiology*, *125*, 29–34. doi :10.1016/j.ijpsycho.2018.01.014
- Iatsun, I., Larabi, M.-C., & Fernandez-Maloigne, C. (2015). Investigation and modeling of visual fatigue caused by S3D content using eye-tracking. *Displays*, *39*(10), 11–25. doi :10.1016/j.displa.2015.07.001
- Ibekwe-Sanjuan, F., & Durampart, M. (2018). Le pluralisme épistémologique et méthodologique en recherche scientifique. *Cahiers du numérique*, *14*(2), 11–30.
- Ijaz, A., Khan, M. Y., Ali, S. M., Qadir, J., & Boulos, M. N. K. (2019). Serious Games for Healthcare Professional Training: A Systematic Review. *European Journal for Biomedical Informatics*, *15*(1), 14–30.
- Iqbal, A., Kankaanranta, M., & Neittaanmäki, P. (2010). Engaging learners through virtual worlds. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(2), 3198–3205. doi :10.1016/j.sbspro.2010.03.489

- Iskander, J., Hossny, M., & Nahavandi, S. (2018). A Review on Ocular Biomechanic Models for Assessing Visual Fatigue in Virtual Reality. *IEEE Access*, 6, 19345–19361. doi :10.1109/access.2018.2815663
- Ittelson, W. H. (1951). Size as a Cue to Distance: Static Localization. *The American Journal of Psychology*, 64(1), 54–67. doi :10.2307/1418595
- Ivanović, M., Klašnja-Milićević, A., Ivković, J., & Porta, M. (2017). Integration of Eye Tracking Technologies and Methods in an E-learning System. Communication présentée au Proceedings of the 8th Balkan Conference in Informatics (BCI '17), Skopje, Macedonia. doi :10.1145/3136273.3136278
- Iwasaki, T. (1993). Effects of a visual task with cognitive demand on dynamic and steady-state accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13(3), 285–290. doi :10.1111/j.1475-1313.1993.tb00470.x
- Jacob, S., Bukhari, S. S., Ishimaru, S., & Dengel, A. (2018). Gaze-based interest detection on newspaper articles. Communication présentée au the 7th Workshop on Pervasive Eye Tracking and Mobile Eye-Based Interaction (PETMEI '18), Warsaw, Poland. doi :10.1145/3208031.3208034
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(9), 641–661. doi :10.1016/j.ijhcs.2008.04.004
- Jensen, L., & Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4), 1515–1529. doi :10.1007/s10639-017-9676-0
- Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. doi :10.1145/2792790.2792793
- Jerald, J., Giokaris, P., Woodall, D., Hartbolt, A., Chandak, A., & Kuntz, S. (2014). Developing virtual reality applications with Unity. Communication présentée au 2014 IEEE Virtual Reality (VR), Minneapolis, MN, USA. doi :10.1109/vr.2014.6802117
- Jeunet, C., Albert, L., & Argelaguet, F. (2018). «Do You Feel in Control? : Towards Novel Approaches to Characterise, Manipulate and Measure the Sense of Agency in Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4), 1486–1495. doi :10.1109/tvcg.2018.2794598
- Jiang, B.-C. (1996). Accommodative vergence is driven by the phasic component of the accommodative controller. *Vision Research*, 36(1), 97–102. doi :10.1016/0042-6989(95)00051-z
- Jiang, B.-C., Hung, G. K., & Ciuffreda, K. J. (2002). Models of Vergence and Accommodation-Vergence Interactions. Dans G. K. Hung & K. J. Ciuffreda, *Models of the Visual System* (pp. 341–384). Boston, MA, USA : Kluwer Academic/Plenum Publishers. doi :10.1007/978-1-4757-5865-8_9

- Jin, D. Y. (2015). Online Games, Globalization of. Dans *The International Encyclopedia of Digital Communication and Society* (pp. 1–7). (S.l.): John Wiley & Sons, Ltd. doi :10.1002/9781118767771.wbiedcs069
- John, B., Raiturkar, P., Banerjee, A., & Jain, E. (2018). An evaluation of pupillary light response models for 2D screens and VR HMDs. *VRST '18 Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. doi :10.1145/3281505.3281538
- Johnson-Glenberg, M. C. (2018). Immersive VR and Education: Embodied Design Principles That Include Gesture and Hand Controls. *Frontiers in Robotics and AI*, 5(81). doi :10.3389/frobt.2018.00081
- Jones, J. A., Suma, E. A., Krum, D. M., & Bolas, M. (2012). Comparability of narrow and wide field-of-view head-mounted displays for medium-field distance judgments (pp. 119–119). Communication présentée au Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception - SAP '12, Los Angeles, California, USA. doi :10.1145/2338676.2338701
- Jones, R. K., & Lee, D. N. (1981). Why two eyes are better than one: The two views of binocular vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(1), 30–40. doi :10.1037//0096-1523.7.1.30
- Jongkees, B. J., & Colzato, L. S. (2016). Spontaneous eye blink rate as predictor of dopamine-related cognitive function—A review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 71(15), 58–82. doi :10.1016/j.neubiorev.2016.08.020
- Jouvent, R. (2008). La réalité virtuelle dans la schizophrénie : un danger ou un outil thérapeutique ? *L'information psychiatrique*, 84(4), 311–316. doi :10.3917/inpsy.8404.0311
- Judge, S. J. (1996). How is binocularity maintained during convergence and divergence? *Eye*, 10(2), 172–176. doi :10.1038/eye.1996.43
- Juhaeri, J., & Dai, W. (2003). Benefit-risk analysis: a proposal using quantitative methods. *Pharmacoepidemiology and Drug Safety*, 12(7), 611–616. doi :10.1002/pds.887
- Julesz, B. (2006). *Foundations of Cyclopean Perception*. The MIT Press.
- Jung, Y. J., Sohn, H., Lee, S.-I., Speranza, F., & Ro, Y. M. (2013). Visual Importance- and Discomfort Region-Selective Low-Pass Filtering for Reducing Visual Discomfort in Stereoscopic Displays. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 23(8), 1408–1421. doi :10.1109/tcsvt.2013.2244796
- Kanski, J. J., Chaine, G., Khammari, C., Sarda, V., & Co, J. S. (2012). *Précis d'ophtalmologie clinique* (2nd éd.). (S.l.) : Elsevier Masson. doi :10.1016/c2012-0-00552-2
- Karadeniz, Ş., & Ergül, I. B. (2019). Educational Technologies in the Age of Transhumanism. Dans S. Sisman-Ugur & G. Kurubacak, *Handbook of Research on Learning in the Age of Transhumanism* (pp. 291–305). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-5225-8431-5.ch018
- Karajeh, H., Maqableh, M., & Masa'deh, R. (2014). A Review on Stereoscopic 3D: Home Entertainment for the Twenty First Century. *3D Research*, 5(4). doi :10.1007/s13319-014-0026-3
- Karpicka, E. (2015). *Visual discomfort whilst viewing 3D stereoscopic stimuli*. Thèse de Doctorat. Loughborough University, UK.

- Kasthurirangan, S. (2011). MRI study of the changes in crystalline lens shape with accommodation and aging in humans. *Journal of Vision, 11*(3), 19. doi :10.1167/11.3.19
- Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., & Plimmer, B. (2017). A systematic review of Virtual Reality in education. *Themes in Science and Technology Education, 10*(2), 85–119.
- Kawahara, J.-I. (2017). Auditory and visual scene analysis: an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 372*(1714). doi :10.1098/rstb.2016.0099
- Kay, D., & Kibble, J. (2016). Learning theories 101: application to everyday teaching and scholarship. *Advances in Physiology Education, 40*(1), 17–25. doi :10.1152/advan.00132.2015
- Keebler, J. R. (2011). *Effects of 3D stereoscopy, visuo-spatial working memory, and perceptions of simulation experience on the memorization of confusable objects* (No. CFE0003939). Thèse de Doctorat. University of Central Florida, Orlando, FL.
- Keller, K., & Colucci, D. (1998). Perception in HMDs: what is it in head-mounted displays (HMDs) that really make them all so terrible? (Vol. 46, pp. 46–53). Communication présentée au Proc. SPIE 3362, Helmet- and Head-Mounted Displays III, Orlando, FL, USA. doi :10.1117/12.317454
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2012). Stereoscopic Viewing Enhances Visually Induced Motion Sickness but Sound Does Not. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 21*(2), 213–228. doi :10.1162/pres_a_00102
- Kessels, R. P. C., van Zandvoort, M. J. E., Postma, A., Kappelle, L. J., & de Haan, E. H. F. (2000). The Corsi Block-Tapping Task: Standardization and Normative Data. *Applied Neuropsychology, 7*(4), 252–258. doi :10.1207/s15324826an0704_8
- Ketelhut, D. J., & Schifter, C. C. (2011). Teachers and game-based learning: Improving understanding of how to increase efficacy of adoption. *Computers & Education, 56*(2), 539–546. doi :10.1016/j.compedu.2010.10.002
- Khandelwal, K., & Upadhyay, A. K. (2019). Virtual reality interventions in developing and managing human resources. *Human Resource Development International, 22*, 1–15. doi :10.1080/13678868.2019.1569920
- Kiili, K., Lainema, T., de Freitas, S., & Arnab, S. (2014). Flow framework for analyzing the quality of educational games. *Entertainment Computing, 5*(4), 367–377. doi :10.1016/j.ent-com.2014.08.002
- Kim, Daehwan, & Ko, Y. J. (2019). The impact of virtual reality (VR) technology on sport spectators' flow experience and satisfaction. *Computers in Human Behavior, 93*(040), 346. doi :10.1016/j.chb.2018.12.040
- Kim, Dongchan, Jung, Y. J., Kim, E., Ro, Y. M., & Park, H. (2011a). Human brain response to visual fatigue caused by stereoscopic depth perception. Communication présentée au 2011 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP), Corfu, Greece. doi :10.1109/icdsp.2011.6004997
- Kim, Donghyun, Choi, S., Park, S., & Sohn, K. (2011b). Stereoscopic visual fatigue measurement based on fusional response curve and eye-blinks. Communication présentée au 2011 17th

International Conference on Digital Signal Processing (DSP).
doi :10.1109/icdsp.2011.6004999

Kim, Gyoung, Jeon, J., & Biocca, F. (2018a). M.I.N.D. Brain Sensor Caps: Coupling Precise Brain Imaging to Virtual Reality Head-Mounted Displays. Dans D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis, *Augmented Cognition: Intelligent Technologies. AC 2018. Lecture Notes in Computer Science, 10915* (pp. 120–130). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-91470-1_11

Kim, Heesung, & Ke, F. (2016). Effects of game-based learning in an OpenSim-supported virtual environment on mathematical performance. *Interactive Learning Environments, 25*(4), 543–557. doi :10.1080/10494820.2016.1167744

Kim, Jeong-Yeop, Kim, S.-H., & So, G.-J. (2016). The Modeling of Color Fatigue in 3-Dimensional Stereoscopic Video. *International Journal of Computer Theory and Engineering, 8*(3), 229–234. doi :10.7763/ijcte.2016.v8.1049

Kim, Joohwan, Kane, D., & Banks, M. S. (2014). The rate of change of vergence–accommodation conflict affects visual discomfort. *Vision Research, 105*, 159–165. doi :10.1016/j.visres.2014.10.021

Kim, Junggho, Kumar, Y. S., Yoo, J., & Kwon, S. (2018b). Change of Blink Rate in Viewing Virtual Reality with HMD. *Symmetry, 10*(9), 400. doi :10.3390/sym10090400

King, P. (2013, 4 octobre). How fast does the brain compute visual information. From light reach the eye, to awareness of impression? And how does the information travel? *www.quora.com*. [En ligne] Consulté le : 30/11/2017. Disponible sur : shorturl.at/uJK35

Koelle, M., Boll, S., Olsson, T., Williamson, J., Profita, H., Kane, S., & Mitchell, R. (2018). (Un)Acceptable!?: Re-thinking the Social Acceptability of Emerging Technologies. Communication présentée au CHI EA '18 Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montreal QC, Canada. doi :10.1145/3170427.3170620

Kolb, B., Whishaw, I. Q., & Teskey, G. C. (2016). *An Introduction to Brain and Behavior* (5^e éd.). (S.l.) : Worth Publishers.

Kong, X., & Liu, Y. (2019). Strategies and Metrics for Evaluating the Quality of Experience in Virtual Reality Applications. Dans T. Ahram, W. Karwowski, & R. Tairar, *Human Systems Engineering and Design. IHSED 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 876* (pp. 314–319). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-02053-8_48

Kosch, T., Hassib, M., Woźniak, P. W., Buschek, D., & Alt, F. (2018). Your Eyes Tell: Leveraging Smooth Pursuit for Assessing Cognitive Workload. Communication présentée au Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), Montreal QC, Canada. doi :10.1145/3173574.3174010

Koszowska-Nowakowska, P., & Renucci, F. (2011). L'hypertexte : approches expérimentale et herméneutique. *Cahiers du numérique, 7*(3), 71–91.

Koulieris, G. A., Drettakis, G., Cunningham, D., & Mania, K. (2016). Gaze prediction using machine learning for dynamic stereo manipulation in games (pp. 113–120). Communication

présentée au 2016 IEEE Virtual Reality (VR), Greenville, SC, USA. doi :10.1109/vr.2016.7504694

Kozhevnikov, M., & Gurlitt, J. (2013). Immersive and non-immersive virtual reality system to learn relative motion concepts. *2013 3rd Interdisciplinary Engineering Design Education Conference*. doi :10.1109/iedec.2013.6526781

Kozulin, P., Ames, S. L., & McBrien, N. A. (2009). Effects of a Head-Mounted Display on the Oculomotor System of Children. *Optometry and Vision Science*, 86(7), 845–856. doi :10.1097/OPX.0b013e3181adff42

Kress, B., Saeedi, E., & Brac-de-la-Perriere, V. (2014). The segmentation of the HMD market: optics for smart glasses, smart eyewear, AR and VR headsets. Communication présentée au Proc. SPIE 9202, Photonics Applications for Aviation, Aerospace, Commercial, and Harsh Environments V, 92020D, San Diego, California, USA. doi :10.1117/12.2064351

Krokos, E., Plaisant, C., & Varshney, A. (2018). Virtual memory palaces: immersion aids recall. *Virtual Reality*, 1–15. doi :10.1007/s10055-018-0346-3

Krueger, M. (2016). Past Presence and Future. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 25(3), 267–286. doi :10.1162/pres_a_00268

Kulshreshth, A., & LaViola, J. J. (2016). Dynamic Stereoscopic 3D Parameter Adjustment for Enhanced Depth Discrimination (pp. 177–187). Communication présentée au Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16, San Jose, California, USA. doi :10.1145/2858036.2858078

Kulshreshth, A., Schild, J., & LaViola, J. J. (2012). Evaluating user performance in 3D stereo and motion enabled video games (pp. 33–40). Communication présentée au Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games - FDG '12, Raleigh, North Carolina, USA. doi :10.1145/2282338.2282350

Kuze, J., & Ukai, K. (2008). Subjective evaluation of visual fatigue caused by motion images. *Displays*, 29(2), 159–166. doi :10.1016/j.displa.2007.09.007

Kweon, S. H., Kweon, H. J., Kim, S.-J., Li, X., Liu, X., & Kweon, H. L. (2018). A Brain Wave Research on VR (Virtual Reality) Usage: Comparison Between VR and 2D Video in EEG Measurement. *Advances in Human Factors and Systems Interaction. AHFE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 592, 194–203. doi :10.1007/978-3-319-60366-7_19

Kwon, C. (2019). Verification of the possibility and effectiveness of experiential learning using HMD-based immersive VR technologies. *Virtual Reality*, 23(11), 101–118. doi :10.1007/s10055-018-0364-1

LaViola, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 32(1), 47–56. doi :10.1145/333329.333344

Laamarti, F., Eid, M., & Saddik, El, A. (2014). An Overview of Serious Games. *International Journal of Computer Games Technology*, 2014, 1–15. doi :10.1155/2014/358152

Laffont, P.-Y., Hasnain, A., Jalil, S. B., Buyukburc, K., Guillemet, P.-Y., Wirajaya, S., et al. (2019). Piezo-actuated varifocal head-mounted displays for virtual and augmented reality.

- Communication présentée au Proc. SPIE 10942, Advances in Display Technologies IX, 1094207, San Francisco, CA, USA. doi :10.1117/12.2509143
- Lafontaine, C. (2000). La cybernétique matrice du posthumanisme. *Cités*, 4, 59–71.
- Lallart, E., Voisin, C., & Jouvent, R. (2014). La réalité virtuelle : un outil de réalisme. *Psychologie Clinique*, 1(37), 82–90. doi :10.1051/psyc/201437082
- Lamb, R. L., Annetta, L., Firestone, J., & Etopio, E. (2018). A meta-analysis with examination of moderators of student cognition, affect, and learning outcomes while using serious educational games, serious games, and simulations. *Computer Standards & Interfaces*, 80, 158–167. doi :10.1016/j.chb.2017.10.040
- Lambooi, M. T. M., IJsselsteijn, W. A., & Heynderickx, I. (2007). Visual discomfort in stereoscopic displays: a review. Communication présentée au Proc. SPIE 6490, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV, 64900I. doi :10.1117/12.705527
- Lambooi, M., & IJsselsteijn, W. (2009). Measuring visual discomfort associated with 3D displays. Communication présentée au Stereoscopic Displays and Applications XX (Proceedings of SPIE ; 7237), San Jose : IS&T SPIE. doi :10.1117/2.1200905.1653
- Lambooi, M., IJsselsteijn, W., Fortuin, M., & Heynderickx, I. (2009). Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53(3), 1–14. doi :10.2352/j.imagingsci.technol.2009.53.3.030201
- Lamme, V. A. F. (2004). Separate neural definitions of visual consciousness and visual attention: a case for phenomenal awareness. *Neural Networks*, 17(5-6), 861. doi :10.1016/j.neunet.2004.02.005
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion. *Vision Research*, 35(3), 389–412. doi :10.1016/0042-6989(94)00176-m
- Lanier, M., Waddell, T. F., Elson, M., Tamul, D., Ivory, J. D., & Przybylski, A. K. (2019). Virtual Reality Check: Statistical Power, Reported Results, and the Validity of Research on the Psychology of Virtual Reality and Immersive Environments. *Computers in Human Behavior*, 100, 70–78. doi :10.31234/osf.io/6hk89
- Le Coadic, Y.-F. (2006). Qu'est-ce qui fait Science dans Science de l'Information ? *Prisma.com*, 49–59.
- Leder, J., Horlitz, T., Puschmann, P., Wittstock, V., & Schütz, A. (2019). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science*, 111, 271–286. doi :10.1016/j.ssci.2018.07.021
- Lee, E., Heo, H., & Park, K. (2010). The comparative measurements of eyestrain caused by 2D and 3D displays. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(3), 1677–1683. doi :10.1109/tce.2010.5606312
- Lee, J.-S. (Éd.). (2019). *Primary Eye Examination: A Comprehensive Guide to Diagnosis*. (S.l.) : Springer, Singapore. doi :https://doi.org/10.1007/978-981-10-6940-6

- Lee, K. M. (2004). Presence, Explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27–50. doi :<https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2004.tb00302.x>
- Leigh, R. J., & Zee, D. S. (2015). The Saccadic System. Dans *The Neurology of Eye Movements* (5^e éd.). (S.l.) : Oxford University Press. doi :10.1093/med/9780199969289.003.0004
- Lemley, M. A., & Volokh, E. (2018). Law, Virtual Reality, and Augmented Reality. *University of Pennsylvania Law Review*, 166. doi :<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2933867>
- Lenskiy, A., & Paprocki, R. (2016). Blink rate variability during resting and reading sessions. Communication présentée au 2016 IEEE Conference on Norbert Wiener in the 21st Century (21CW), Melbourne, VIC, Australia. doi :10.1109/norbert.2016.7547466
- Leppink, J. (2017). Cognitive load theory: Practical implications and an important challenge. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 12(5), 385–391. doi :10.1016/j.jtumed.2017.05.003
- Leroy, L. (2009). *Interfaçage visuel stéréoscopique : diminution de la fatigue visuelle et caractérisation de la perception des formes* (No. 2009ENMP1673). *Perception et agnosies*. Thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Leroy, L. (2016). *Diminution de la fatigue visuelle en stéréoscopie* (1^{re} éd.). (S.l.) : ISTE éditions.
- Leroy, L., Fuchs, P., & Moreau, G. (2012). Real-time adaptive blur for reducing eye strain in stereoscopic displays (Vol. 9). Communication présentée au ACM Transactions on Applied Perception, New York, NY, USA. doi :10.1145/2207216.2207220
- Li, Jing, Barkowsky, M., & Le Callet, P. (2013). Visual discomfort is not always proportional to eye blinking rate: exploring some effects of planar and in-depth motion on 3DTV QoE (pp. 1–6). Communication présentée au International Workshop on Video Processing and QualityMetrics for Consumer Electronics VPQM 2013, Scottsdale, AZ, USA.
- Lie, I. (1965). Convergence as a cue to perceived size and distance. *Scandinavian Journal of Psychology*, 6(4), 109–116. doi :10.1111/j.1467-9450.1965.tb01059.x
- Lim, S., & Reeves, B. (2010). Computer agents versus avatars: Responses to interactive game characters controlled by a computer or other player. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(1-2), 57–68. doi :10.1016/j.ijhcs.2009.09.008
- Limniou, M., Roberts, D., & Papadopoulos, N. (2008). Full immersive virtual environment CAVE™ in chemistry education. *Computers & Education*, 51(2), 584–593. doi :10.1016/j.compedu.2007.06.014
- Limperos, A., Waddell, T. F., Ivory, A. H., & Ivory, J. D. (2014). Psychological and physiological responses to stereoscopic 3d presentation in handheld digital gaming: Comparing the experiences of frequent and infrequent game. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 23(4), 341–353. doi :10.1162/pres_a_00204
- Lin, C. J., & Woldegiorgis, B. H. (2015). Interaction and visual performance in stereoscopic displays: A review. *Journal of the Society for Information Display*, 23(7), 319–332. doi :10.1002/jsid.378

- Lin, H.-H., Wang, Y.-Y., Wang, Y.-S., & Wang, Y.-M. (2018). Measuring perceived physiological vulnerability to IT usage: an initial test in a virtual reality-based learning environment. *Interactive Learning Environments*, 27(7). doi :10.1080/10494820.2018.1545672
- Lin, W. (2016). *Evaluation of computerised programs for the diagnosis and treatment of binocular anomalies*. Thèse de Doctorat. The University of Manchester, Manchester, UK.
- Lindeman, R. W., & Beckhaus, S. (2009). Crafting memorable VR experiences using experiential fidelity. *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '09*, 187–190. doi :10.1145/1643928.1643970
- Ling, Y., Brinkman, W.-P., Nefs, H. T., Qu, C., & Heynderickx, I. (2012). Effects of Stereoscopic Viewing on Presence, Anxiety, and Cybersickness in a Virtual Reality Environment for Public Speaking. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(3), 254–267. doi :10.1162/pres_a_00111
- Linowes, J. (2015). *Unity Virtual Reality Projects* (1^{re} éd.). (S.l.) : Packt Publishing.
- Liu, S. (2018, 8 janvier). Global unit sales of virtual reality head-mounted displays 2016 and 2020. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/697159/head-mounted-display-unit-sales-worldwide/>
- Liu, S. (2019a, 3 mai). Global consumer virtual reality market size 2016-2022. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/528779/virtual-reality-market-size-worldwide/>
- Liu, S. (2019b, 3 mai). Number of virtual reality users forecast worldwide 2014-2018. *www.statista.com*. [En ligne] Consulté le : 16/07/2019. Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/426469/active-virtual-reality-users-worldwide/>
- Liu, S. (2019c, 8 mai). VR device market share by vendor worldwide 2018. *www.statista.com*. Consulté le : 16/07/2019. [En ligne] Disponible sur : <https://www.statista.com/statistics/755645/global-vr-device-market-share-by-vendor/>
- Liu, X., Zhang, J., Hou, G., & Wang, Z. (2018). Virtual Reality and Its Application in Military. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170, 032155. doi :10.1088/1755-1315/170/3/032155
- Liu, Y., Wang, F., & Wang, C. (2009). The research on visual fatigue factor in stereoscopic image observation. Communication présentée au 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Wenzhou, China. doi :10.1109/caidcd.2009.5375123
- Loahavilai, P.-O., Chakpitak, N., Sureephong, P., & Dahal, K. (2015). Serious game to motivate the knowledge sharing among knowledge technicians in machinery relocation of foreign direct investment (pp. 1–7). Communication présentée au 2015 9th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). doi :10.1109/skima.2015.7400047
- Lohr, D. J., Abdulin, E., & Komogortsev, O. V. (2016). Detecting the onset of eye fatigue in a live framework. *Anaesthesia*, 63(10), 1145. doi :10.1145/2857491.2884058

- Lombart, C., Millan, E., Normand, J.-M., Verhulst, A., Labbé-Pinlon, B., & Moreau, G. (2019). Consumer perceptions and purchase behavior toward imperfect fruits and vegetables in an immersive virtual reality grocery store. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 48, 28–40. doi :10.1016/j.jretconser.2019.01.010
- Loup-Escande, E., Jamet, E., Ragot, M., Erhel, S., & Michinov, N. (2017). Effects of Stereoscopic Display on Learning and User Experience in an Educational Virtual Environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 33(2), 115–122. doi :10.1080/10447318.2016.1220105
- Lugmayr, A., Lim, Y. J., Hollick, J., Khuu, J., & Chan, F. (2019). Financial Data Visualization in 3D on Immersive Virtual Reality Displays. Dans N. Mehandjiev & B. Saadouni, *Enterprise Applications, Markets and Services in the Finance Industry. FinanceCom 2018. Lecture Notes in Business Information Processing*, 345 (pp. 118–130). (S.l.): Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-19037-8_8
- Lutkewitte, C. (2013). *Multimodal Composition: A Critical Sourcebook* (1^{re} éd.). Boston, USA : Bedford/St. Martin's.
- López, M. M. (2018). *The effectiveness of training in virtual environments*. Thèse de Doctorat. University College London (UCL), London, UK.
- Ma, Y., Williams, D., Prejean, L., & Richard, C. (2007). A research agenda for developing and implementing educational computer games. *British Journal of Educational Technology*, 38(3), 513–518. doi :10.1111/j.1467-8535.2007.00714.x
- Mack, K., & Ruud, R. (2019). *Unreal Engine 4 Virtual Reality Projects* (1^{re} éd.). (S.l.) : Packt Publishing.
- Majaranta, P., & Bulling, A. (2014). Eye Tracking and Eye-Based Human–Computer Interaction. Dans S. H. Fairclough & K. Gilleade, *Advances in Physiological Computing*, 118 (pp. 39–65). (S.l.) : Springer, London. doi :10.1007/978-1-4471-6392-3_3
- Majaranta, P., & Rähkä, K.-J. (2012). Communication and text entry by gaze. Dans P. Majaranta, H. Aoki, M. Donegan, D. W. Hansen, J. P. Hansen, A. Hyrskykari, & K.-J. Rähkä, *Gaze Interaction and Applications of Eye Tracking: Advances in Assistive Technologies* (pp. 63–77). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-61350-098-9.ch008
- Makransky, G., Borre-Gude, S., & Mayer, R. E. (2019). Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. *Journal of Computer Assisted Learning*, 1–17. doi :10.1111/jcal.12375
- Makransky, G., Lilleholt, L., & Aaby, A. (2017). Development and validation of the Multimodal Presence Scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach. *Computers in Human Behavior*, 72, 276–285. doi :10.1016/j.chb.2017.02.066
- Malik, A. S., & Amin, H. U. (2017). Visual and Cognitive Fatigue During Learning. Dans A. S. Malik & H. UllahAmin, *Designing EEG Experiments for Studying the Brain* (pp. 123–135). (S.l.) : Academic Press. doi :10.1016/b978-0-12-811140-6.00008-4

- Malone, T. W. (1980). What makes things fun to learn? heuristics for designing instructional computer games. Communication présentée au Proceedings of the 3rd ACM SIGSMALL symposium and the first SIGPC symposium on Small systems - SIGSMALL '80, Palo Alto, California, USA. doi :10.1145/800088.802839
- Marchand, A., & Hennig-Thurau, T. (2013). Value Creation in the Video Game Industry: Industry Economics, Consumer Benefits, and Research Opportunities. *Journal of Interactive Marketing*, 27(3), 141–157. doi :10.1016/j.intmar.2013.05.001
- Markowitz, D. M., Laha, R., Perone, B. P., Pea, R. D., & Bailenson, J. N. (2018). Immersive Virtual Reality Field Trips Facilitate Learning About Climate Change. *Frontiers in Psychology*, 9. doi :10.3389/fpsyg.2018.02364
- Marran, L., & Schor, C. M. (2000). Binocular Accommodation. Dans O. Franzén, H. Richter, & L. Stark, *Accommodation and Vergence Mechanisms in the Visual System* (pp. 245–257). (S.l.) : Birkhäuser. doi :https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7586-8_22
- Marsh, T. (2011). Serious games continuum: Between games for purpose and experiential environments for purpose. *Entertainment Computing*, 2(2), 61–68. doi :10.1016/j.entcom.2010.12.004
- Martens, A., & Müller, W. (2015). Gamification. Dans *Handbook of Digital Games and Entertainment Technologies* (pp. 1–23). (S.l.) : Springer Singapore. doi :10.1007/978-981-4560-52-8_66-1
- Martin, L. (2018). *L'usage des serious games en entreprise*. Toulouse, France : ERES. doi :10.3917/eres.marti.2018.01
- Martins, R., & Carvalho, J. (2015). Eye blinking as an indicator of fatigue and mental load—a systematic review. Dans P. M. Arezes, J. S. Baptista, M. P. Barroso, P. Carneiro, P. Cordeiro, N. Costa, *et al.*, *Occupational Safety and Hygiene III*, 48 (pp. 231–235). (S.l.) : Taylor & Francis Group. doi :10.1201/b18042-48
- Martí-Parreño, J., Méndez-Ibáñez, E., & Alonso-Arroyo, A. (2016). The use of gamification in education: a bibliometric and text mining analysis. *Journal of Computer Assisted Learning*, 32(6), 663–676. doi :10.1111/jcal.12161
- Marín-Morales, J., Higuera-Trujillo, J. L., Greco, A., Guixeres, J., Llinares, C., Scilingo, E. P., *et al.* (2018). Affective computing in virtual reality: emotion recognition from brain and heart-beat dynamics using wearable sensors. *Scientific Reports*, 8. doi :10.1038/s41598-018-32063-4
- Mason, J., & Loader, K. (2019). Using a Serious Game to Train Violence Risk Assessment and Management Skills. *Simulation & Gaming*, 50(2), 1–12. doi :10.1177/1046878119837314
- Masquelier, T., Albantakis, L., & Deco, G. (2011). The Timing of Vision – How Neural Processing Links to Different Temporal Dynamics. *Frontiers in Psychology*, 2. doi :10.3389/fpsyg.2011.00151
- Matsuura, S. (2013). Usage of stereoscopic visualization in the learning contents of rotational motion (pp. 7192–7195). Communication présentée au 2013 35th Annual International

- Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, Japan. doi :10.1109/embc.2013.6611217
- Matsuura, Y. (2019). Aftereffect of Stereoscopic Viewing on Human Body II. Dans H. Takada, M. Miyao, & S. Fateh, *Current Topics in Environmental Health and Preventive Medicine* (1^{re} éd., pp. 89–99). (S.l.) : Springer, Singapore. doi :10.1007/978-981-13-1601-2_8
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. *Psychology of learning and motivation*, 85–139.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2nd éd.). New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014a). Cognitive Theory of Multimedia Learning. Dans *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2nd éd., pp. 43–48). (S.l.) : Cambridge University Press. doi :10.1017/cbo9781139547369.005
- Mayer, R. E. (2014b). Cognitive Theory of Multimedia Learning. Dans *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2nd éd., pp. 31–00). (S.l.) : Cambridge University Press. doi :10.1017/cbo9780511816819.004
- Mayer, R. E. (2019). Computer Games in Education. *Annual Review of Psychology*, 70(1), 531–549. doi :10.1146/annurev-psych-010418-102744
- Mays, L. (2008). Accommodation–Vergence Interactions. Dans M. D. Binder, N. Hirokawa, & U. Windhorst, *Encyclopedia of Neuroscience*. (S.l.) : Springer, Berlin, Heidelberg. doi :<https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2>
- McAuslane, N., Leong, J., Liberti, L., & Walker, S. (2017). The Benefit-Risk Assessment of Medicines: Experience of a Consortium of Medium-Sized Regulatory Authorities. *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*, 51(5), 635–644. doi :10.1177/2168479017696260
- McDonald, E. (2017, juin). Newzoo’s 2017 Report: Insights into the \$108.9 Billion Global Games Market. *www.newzoo.com*. [En ligne] Consulté le : 09/07/2019. Disponible sur : <https://newzoo.com/insights/articles/newzoo-2017-report-insights-into-the-108-9-billion-global-games-market/>
- McIntire, J. P., Havig, P. R., & Geiselman, E. E. (2012). What is 3D good for? A review of human performance on stereoscopic 3D displays. Communication présentée au Head- and Helmet-Mounted Displays XVII; and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI, Baltimore, Maryland, USA. doi :10.1117/12.920017
- McIntire, J. P., Havig, P. R., & Geiselman, E. E. (2014). Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review. *Displays*, 35(1), 18–26. doi :10.1016/j.displa.2013.10.004
- McMahan, A. (2003). Immersion, engagement and presence. Dans K. Collins, B. Kapralos, & H. Tessler, *The Oxford Handbook of Interactive Audio* (pp. 67–86). (S.l.) : Oxford University Press. doi :10.1093/oxfordhb/9780199797226.013.016
- Mellet d’Huart, D. (2001). La réalité virtuelle : un média pour apprendre (pp. 331–338). Communication présentée au Cinquième colloque Hypermédias et apprentissages, Grenoble, France.

- Melzer, J. (2017). How much is enough? the human factors of field of view in head-mounted displays. Communication présentée au Proc. SPIE 10197, Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display, Anaheim, CA, USA. doi :10.1117/12.2263334
- Menin, A., Torchelsen, R., & Nedel, L. (2018). An Analysis of VR Technology Used in Immersive Simulations with a Serious Game Perspective. *Contraception*, 38(2), 57–73. doi :10.1109/mcg.2018.021951633
- Merhi, O., Faugloire, E., Flanagan, M., & Stoffregen, T. A. (2007). Motion Sickness, Console Video Games, and Head-Mounted Displays. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 920–934. doi :10.1518/001872007x230262
- Meyer, O. A., Omdahl, M. K., & Makransky, G. (2019). Investigating the effect of pre-training when learning through immersive virtual reality and video: A media and methods experiment. *Computers & Education*, 140, 103603. doi :10.1016/j.compedu.2019.103603
- Michael, D. R., & Chen, S. L. (2005). *Serious games: Games that educate, train, and inform*. (S.l.) : Muska & Lipman/Premier-Trade. Course Technology Inc.
- Michaud, T. (2017). De la science-fiction à l'innovation technoscientifique : le cas des casques de réalité virtuelle. *Innovations*, 52(1), 43–61. doi :10.3917/inno.052.0043
- Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, 56(3), 769–780. doi :10.1016/j.compedu.2010.10.020
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. Communication présentée au Proc. SPIE 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies, 282, Boston, MA, USA. doi :10.1117/12.197321
- Miller, K. M., York, R. T., & Goss, D. (1996). Importance of proximity cues on the distance rock accommodative facility test. *Journal of Behavioral Optometry*, 7(4), 93–96.
- Millodot, M. (2017). *Dictionary of Optometry and Vision Science* (8^e éd.). (S.l.) : Elsevier.
- Miloff, A., Lindner, P., Dafgård, P., Deak, S., Garke, M., Hamilton, W., *et al.* (2019). Automated virtual reality exposure therapy for spider phobia vs. in-vivo one-session treatment: A randomized non-inferiority trial. *Behaviour Research and Therapy*, 118, 130–140. doi :10.1016/j.brat.2019.04.004
- Mine, M. R., Brooks, F. P., & Sequin, C. H. (1997). Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction (pp. 19–26). Communication présentée au Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '97, New York, NY, USA. doi :10.1145/258734.258747
- Mistry, M., Roach, V. A., & Wilson, T. D. (2013). Application of Stereoscopic Visualization on Surgical Skill Acquisition in Novices. *Journal of Surgical Education*, 70(5), 563–570. doi :10.1016/j.jsurg.2013.04.006
- Mitchell, D. E. (1966). A review of the concept of «Panum's fusional areas . *Optometry and Vision Science*, 43(6), 387–401. doi :10.1097/00006324-196606000-00004

- Mon-Williams, M., & Wann, J. P. (1998). Binocular Virtual Reality Displays: When Problems Do and Don't Occur. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40(1), 42–49. doi :10.1518/001872098779480622
- Mon-Williams, M., Warm, J. P., & Rushton, S. (1993). Binocular vision in a virtual world: visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13(4), 387–391. doi :10.1111/j.1475-1313.1993.tb00496.x
- Moreno, R. (2010). Cognitive load theory: more food for thought. *Instructional Science*, 38(2), 135–141. doi :10.1007/s11251-009-9122-9
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2002). Learning science in virtual reality multimedia environments: Role of methods and media. *Journal of Educational Psychology*, 94(3), 598–610. doi :10.1037//0022-0663.94.3.598
- Moro, C., Štromberga, Z., & Stirling, A. (2017). Virtualisation devices for student learning: Comparison between desktop-based (Oculus Rift) and mobile-based (Gear VR) virtual reality in medical and health science education. *Australasian Journal of Educational Technology*, 33(6), 1–10. doi :10.14742/ajet.3840
- Morris, C. P. (2018, 19 avril). The Demographics of Video Gaming. *www.earnest.com*. [En ligne] Consulté le : 09/07/2019. Disponible sur : <https://www.earnest.com/blog/the-demographics-of-video-gaming/>
- Morse, S. E., & Jiang, B.-C. (1999). Oculomotor Function After Virtual Reality Use Differentiates Symptomatic from Asymptomatic Individuals. *Optometry and Vision Science*, 76(9), 637–642. doi :10.1097/00006324-199909000-00021
- Moss, J. D. (2008). *Characteristics of head-mounted displays and their effects on simulator sickness*. Thèse de Doctorat. Clemson University, USA.
- Mottelson, A., & Hornbæk, K. (2017). Virtual reality studies outside the laboratory. Communication présentée au Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'17), Gothenburg, Sweden. doi :10.1145/3139131.3139141
- Mucchielli, A. (1996). Pour des recherches en communication. *Communication et organisation* 10. doi :10.4000/communicationorganisation.1877
- Mukai, A., Yamagishi, Y., & Hirayama, M. J. (2011). Effects of stereoscopic 3D contents on the process of learning to build a handmade PC. *Knowledge Management and E-Learning*, 3(2), 491–506. doi :10.5392/jkca.2010.10.2.138
- Mun, S., Park, M.-C., Park, S., & Whang, M. (2012). SSVEP and ERP measurement of cognitive fatigue caused by stereoscopic 3D. *Neuroscience Letters*, 525(2), 89–94. doi :10.1016/j.neulet.2012.07.049
- Murata, A. (2004). Effects of duration of immersion in a virtual reality environment on postural stability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(4), 463–477. doi :10.1207/s15327590ijhc1704_2
- Nacke, L. E., & Deterding, S. (2017). The maturing of gamification research. *Computers in Human Behavior*, 71, 450–454. doi :10.1016/j.chb.2016.11.062

- Nannipieri, O. (2011). L'homme, la machine et le sacré : quand la réalité virtuelle réenchante le monde. *ESSACHESS – Journal for Communication Studies*, 4(8), 191–202.
- Nannipieri, O. (2017). *Du réel au virtuel* (1^{re} éd.). (S.l.) : Editions L'Harmattan.
- Nannipieri, O., & Muratore, I. (2016). Les Statistiques: Un Pharmakon Pour La Communication ? *ESSACHESS: Journal for Communication Studies*, 9(1(17)), 79–94.
- Nannipieri, O., Muratore, I., Dumas, P., & Renucci, F. (2014). Distic immersif, subjectivité et communication : une analyse de la présence dans les environnements immersifs (pp. 125–134). Communication présentée au XIX^{ème} Congrès de la Société Française des Sciences de l'Information et de la Communication, SFSIC, Toulon, France.
- Neumann, D. L., Moffitt, R. L., Thomas, P. R., Loveday, K., Watling, D. P., Lombard, C. L., et al. (2018). A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport. *Virtual Reality*, 22(3), 183–198. doi :10.1007/s10055-017-0320-5
- Neveu, P. (2012). *L'impact des dispositifs de visualisation en relief sur les composantes oculomotrices d'accommodation et de vergence*. Thèse de Doctorat. Université Paris 8.
- Neveu, P., Priot, A.-E., Fuchs, P., & Roumes, C. (2009). Retentissement du sur-écartement interpupillaire sur l'équilibre oculomoteur. Communication présentée au Journées de Médecine Aéronautique, Paris, France.
- Nichols, S. (1999). Physical ergonomics of virtual environment use. *Applied Ergonomics*, 30(1), 79–90. doi :10.1016/s0003-6870(98)00045-3
- Nichols, S., & Patel, H. (2002). Health and safety implications of virtual reality: a review of empirical evidence. *Applied Ergonomics*, 33(3), 251–271. doi :10.1016/s0003-6870(02)00020-0
- Niehorster, D. C., Li, L., & Lappe, M. (2017). The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *i-Perception*, 1–23. doi :10.1177/2041669517708205
- Novikov, D. A. (2016). *Cybernetics: From Past to Future*, 47 (1^{re} éd.). Switzerland : Springer International Publishing. doi :10.1007/978-3-319-27397-6
- Novotney, A. (2015). Do educational computer and video games lead to real learning gains? Psychologists say more research is needed. *Gaming to learn*, 46(4), 46.
- Noël, D. (2007). Le virtuel selon Deleuze. *Intellectica*, 45(1), 109–127.
- Nuzzo, R. (2014). Scientific method: Statistical errors. *Nature*, 506, 150–152. doi :10.1038/506150a
- Oberdörfer, S., & Latoschik, M. E. (2019). Knowledge Encoding in Game Mechanics: Transfer-Oriented Knowledge Learning in Desktop-3D and VR. *International Journal of Computer Games Technology*, 2019, 1–17. doi :10.1155/2019/7626349
- Oh, C., Ham, B., Choi, S., & Sohn, K. (2015). Visual Fatigue Relaxation for Stereoscopic Video via Nonlinear Disparity Remapping. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 61(2), 142–153. doi :10.1109/tbc.2015.2402471

- Oliveira, S., Jorge, J., & González-Méijome, J. M. (2012). Dynamic accommodative response to different visual stimuli (2D vs 3D) while watching television and while playing Nintendo 3DS Console. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 32(5), 383–389. doi :10.1111/j.1475-1313.2012.00934.x
- Olmos, E., Cavalcanti, J. F., Soler, J.-L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2018). Mobile Virtual Reality: A Promising Technology to Change the Way We Learn and Teach. Dans *Perspectives on Rethinking and Reforming Education* (pp. 95–106). (S.l.): Springer, Singapore. doi :10.1007/978-981-10-6144-8_6
- Olshannikova, E., Ometov, A., Koucheryavy, Y., & Olsson, T. (2015). Visualizing Big Data with augmented and virtual reality: challenges and research agenda. *Journal of Big Data*, 2(22), 1–27. doi :10.1186/s40537-015-0031-2
- Onwuegbuzie, A. J., & Leech, N. L. (2005). On Becoming a Pragmatic Researcher: The Importance of Combining Quantitative and Qualitative Research Methodologies. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(5), 375–387. doi :10.1080/13645570500402447
- Osborn, G. (2017, 3 mai). Male and Female Gamers: How Their Similarities and Differences Shape the Games Market. *www.newzoo.com*. [En ligne] Consulté le : 09/07/2019. Disponible sur : <https://newzoo.com/insights/articles/male-and-female-gamers-how-their-similarities-and-differences-shape-the-games-market/>
- O'Connor, A. R., Birch, E. E., Anderson, S., & Draper, H. (2010). Relationship between Binocular Vision, Visual Acuity, and Fine Motor Skills. *Optometry and Vision Science*, 87(12), 942–947. doi :10.1097/OPX.0b013e3181fd132e
- O'Connor, E. A., & Domingo, J. (2017). A Practical Guide, With Theoretical Underpinnings, for Creating Effective Virtual Reality Learning Environments. *Journal of Educational Technology Systems*, 45(3), 343–364. doi :10.1177/0047239516673361
- Pallavicini, F., Ferrari, A., & Mantovani, F. (2018). Video Games for Well-Being: A Systematic Review on the Application of Computer Games for Cognitive and Emotional Training in the Adult Population. *Frontiers in Psychology*, 9(41), 02127. doi :10.3389/fpsyg.2018.02127
- Pandey, S., Doyle, J., Bian, B., & Lis, Y. (2010). A Review of Quantitative Risk–Benefit Methodologies for Assessing Drug Safety and Efficacy—Report of the ISPOR Risk–Benefit Management Working Group. *Value in Health*, 13(5), 657–666. doi :10.1111/j.1524-4733.2010.00725.x
- Papastergiou, M. (2009). Digital game-based learning in high school computer science education: Impact on educational effectiveness and student motivation. *Computers & Education*, 52(1), 1–12. doi :10.1016/j.compedu.2008.06.004
- Paprocki, R., & Lenskiy, A. (2017). What Does Eye-Blink Rate Variability Dynamics Tell Us About Cognitive Performance? *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. doi :10.3389/fnhum.2017.00620
- Parikh, S., & Kalva, H. (2018). Predicting Learning Difficulty Based on Gaze and Pupil Response (pp. 131–135). Communication présentée au Adjunct Publication of the 26th

- Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP '18), Singapore, Singapore. doi :10.1145/3213586.3226224
- Park, M.-C., & Mun, S. (2015). Overview of Measurement Methods for Factors Affecting the Human Visual System in 3D Displays. *Journal of Display Technology*, *11*(11), 877–888. doi :10.1109/jdt.2015.2389212
- Park, S., Kyung, G., Choi, D., Yi, J., Lee, S., Choi, B., & Lee, S. (2019). Effects of display curvature and task duration on proofreading performance, visual discomfort, visual fatigue, mental workload, and user satisfaction. *Applied Ergonomics*, *78*(01), 26–36. doi :10.1016/j.apergo.2019.01.014
- Park, S., Won, M. J., Lee, E. C., Mun, S., Park, M.-C., & Whang, M. (2015). Evaluation of 3D cognitive fatigue using heart–brain synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, *97*(2), 120–130. doi :10.1016/j.ijpsycho.2015.04.006
- Park, S., Won, M. J., Mun, S., Lee, E. C., & Whang, M. (2014). Does visual fatigue from 3D displays affect autonomic regulation and heart rhythm? *International Journal of Psychophysiology*, *92*(1), 42–48. doi :10.1016/j.ijpsycho.2014.02.003
- Parker, A. J. (2016). Vision in our three-dimensional world. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, *371*(1697). doi :10.1098/rstb.2015.0251
- Parker, L. (1983). The History Of Stereoscopy In Art, Science And Entertainment. *Proc. SPIE 0391, Optics in Entertainment*. doi :https://doi.org/10.1117/12.935066
- Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, *110*(6), 785–797. doi :10.1037/edu0000241
- Parsons, T. D., & Reinebold, J. L. (2012). Adaptive virtual environments for neuropsychological assessment in serious games. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, *58*(2), 197–204. doi :10.1109/tce.2012.6227413
- Patterson, R. (2009). Review Paper: Human factors of stereo displays: An update. *Journal of the Society for Information Display*, *17*(12), 987–996. doi :10.1889/jsid17.12.987
- Patterson, R. E. (2014). Basics of Human Binocular Vision. Dans *Human Factors of Stereoscopic 3D Displays* (pp. 9–21). (S.l.) : Springer, London. doi :10.1007/978-1-4471-6651-1_2
- Patterson, R., Winterbottom, M. D., & Pierce, B. J. (2006). Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *48*(3), 555–573. doi :10.1518/001872006778606877
- Pautasso, M. (2013). Ten Simple Rules for Writing a Literature Review. *PLoS computational biology*, *9*(7), e1003149. doi :10.1371/journal.pcbi.1003149
- Pavlas, D., Heyne, K., Bedwell, W., Lazzara, E., & Salas, E. (2010). Game-based learning: The impact of flow state and videogame self-efficacy (Vol. 54, pp. 2398–2402). Communication présentée au Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Francisco, CA. doi :10.1037/e578892012-009
- Pearson, J., & Clifford, C. W. G. (2005). When your brain decides what you see: Grouping across monocular, binocular and stimulus rivalry. *Journal of Vision*, *5*(8), 703–703a. doi :10.1167/5.8.703

- Peinkhofer, C., Knudsen, G. M., Moretti, R., & Kondziella, D. (2019). Cortical modulation of pupillary function: systematic review. *PeerJ* 7:e6882, 15(37), 7717. doi :<https://doi.org/10.7717/peerj.6882>
- Peitek, N., Siegmund, J., Parnin, C., Apel, S., & Brechmann, A. (2018). Beyond gaze: preliminary analysis of pupil dilation and blink rates in an fMRI study of program comprehension. Communication présentée au Proceedings of the Workshop on Eye Movements in Programming (EMIP '18), Warsaw, Poland. doi :[10.1145/3216723.3216726](https://doi.org/10.1145/3216723.3216726)
- Peißl, S., Wickens, C. D., & Baruah, R. (2018). Eye-Tracking Measures in Aviation: A Selective Literature Review. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 28(3-4), 98–112. doi :[10.1080/24721840.2018.1514978](https://doi.org/10.1080/24721840.2018.1514978)
- Peli, E. (1998). The visual effects of head-mounted display (HMD) are not distinguishable from those of desk-top computer display. *Vision Research*, 38(13), 2053–2066. doi :[10.1016/s0042-6989\(97\)00397-0](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(97)00397-0)
- Perrin, J. (1998). *Profondeur et binocularité : algorithmie, étude psychophysique et intérêt pour l'ergonomie des interfaces stéréoscopiques*. Thèse de Doctorat. Ecole des Mines de Paris, Paris, France.
- Perttula, A., Kiili, K., Lindstedt, A., & Tuomi, P. (2017). Flow experience in game based learning – a systematic literature review. *International Journal of Serious Game*, 4(1), 51–72. doi :[10.17083/ijsg.v4i1.151](https://doi.org/10.17083/ijsg.v4i1.151)
- Petri, G., & Wangenheim, von, C. G. (2017). How games for computing education are evaluated? A systematic literature review. *Computers & Education*, 107(01), 68–90. doi :[10.1016/j.compedu.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.01.004)
- Piano, M. E. F., Tidbury, L. P., & O'Connor, A. R. (2016). Normative Values for Near and Distance Clinical Tests of Stereoacuity. *Strabismus*, 24(4), 169–172. doi :[10.1080/09273972.2016.1242636](https://doi.org/10.1080/09273972.2016.1242636)
- Picard, M. (2008). Video games and their relationship with other media. Dans M. J. P. Wolf, *The Video Game Explosion: A History from Pong to Playstation and Beyond* (pp. 293–300). (S.l.) : Greenwood. doi :[10.1109/gem.2014.7048088](https://doi.org/10.1109/gem.2014.7048088)
- Pirker, J., Lesjak, I., Parger, M., & Gütl, C. (2018). An Educational Physics Laboratory in Mobile Versus Room Scale Virtual Reality - A Comparative Study. Dans M. E. Auer & D. G. Zutin, *Online Engineering & Internet of Things. Lecture Notes in Networks and Systems*, 22 (pp. 1029–1043). (S.l.) : Springer, Cham. doi :[10.1007/978-3-319-64352-6_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_95)
- Pontille, D. (2007). Matérialité des écrits scientifiques et travail de frontières : le cas du format IMRAD. Dans P. Hert & M. Paul-Cavallier, *Sciences et frontières* (pp. 229–253). (S.l.) : E.M.E.
- Porcino, T. M., Clua, E., Trevisan, D., Vasconcelos, C. N., & Valente, L. (2017). Minimizing cyber sickness in head mounted display systems: Design guidelines and applications (pp. 1–6). Communication présentée au 2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH), Perth, WA, Australia. doi :[10.1109/segah.2017.7939283](https://doi.org/10.1109/segah.2017.7939283)
- Potgieter, P., & Blignaut, P. (2018). A system to determine if learners know the divisibility rules and apply them correctly. Communication présentée au Proceedings of the 2018 ACM

- Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Warsaw, Poland. doi :10.1145/3204493.3204526
- Price, A., Lee, H.-S., Plummer, J. D., Subbarao, M., & Wyatt, R. (2015a). Position Paper On Use Of Stereoscopy To Support Science Learning: Ten Years Of Research. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 2(1), 17–26. doi :10.19030/jaese.v2i1.9278
- Price, A., Lee, H.-S., Subbarao, M., Kasal, E., & Aguilera, J. (2015b). Comparing Short- and Long-Term Learning Effects Between Stereoscopic and Two-Dimensional Film at a Planetarium. *Science Education*, 99(6), 1118–1142. doi :10.1002/sce.21185
- Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006). Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123–138. doi :10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x
- Prince, M. J., & Felder, R. M. (2007a). The Case for Inductive Teaching. *ASEE Prism*, 17(2), 55.
- Prince, M. J., & Felder, R. M. (2007b). The Many Faces of Inductive Teaching and Learning. *Journal of College Science Teaching*, 36(5), 14–20.
- Procci, K., Singer, A. R., Levy, K. R., & Bowers, C. (2012). Measuring the flow experience of gamers: An evaluation of the DFS-2. *Computers in Human Behavior*, 28(6), 2306–2312. doi :10.1016/j.chb.2012.06.039
- Pérez, V. V., Saiz, D. D. F., & Verdú, F. M. (2010). Colour vision: theories and principles. Dans M. L. Gulrajani, *Colour Measurement: Principles, Advances and Industrial Applications* (pp. 3–18). (S.l.) : Woodhead Publishing. doi :https://doi.org/10.1533/9780857090195.1.3
- Pölonen, M. (2010). *A head-mounted display as a personal viewing device: Dimensions of subjective experiences*. PhD Thesis - Helsinki University, Helsinki, Finland.
- Rac-Lubashevsky, R., Slagter, H. A., & Kessler, Y. (2017). Tracking Real-Time Changes in Working Memory Updating and Gating with the Event-Based Eye-Blink Rate. *Scientific Reports*, 7(1), 017. doi :10.1038/s41598-017-02942-3
- Ragan, E. D. (2010). The Effects of Higher Levels of Immersion on Procedure Memorization Performance and Implications for Educational Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(6), 527–543. doi :10.1162/pres_a_00016
- Rajan, A. V., Nassiri, N., Akre, V., Ravikumar, R., Nabeel, A., Buti, M., & Salah, F. (2018). Virtual Reality Gaming Addiction. Communication présentée au 2018 Fifth HCT Information Technology Trends (ITT), Dubai, UAE. doi :10.1109/ctit.2018.8649547
- Rau, P.-L. P., Zheng, J., Guo, Z., & Li, J. (2018). Speed reading on virtual reality and augmented reality. *Computers & Education*, 125, 240–245. doi :10.1016/j.compedu.2018.06.016
- Ravelli, Q. (2018). L'ascension du jeu au travail : The Gamification of Work, en théories et en pratiques. *Travailler*, 39(1), 155–160. doi :10.3917/trav.039.0155
- Ray, A. B., & Deb, S. (2016). Smartphone Based Virtual Reality Systems in Classroom Teaching — A Study on the Effects of Learning Outcome. Communication présentée au 2016 IEEE Eighth International Conference on Technology for Education (T4E), Mumbai, India. doi :10.1109/t4e.2016.022

- Raybourn, E. M. (2014). A new paradigm for serious games: Transmedia learning for more effective training and education. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 5(3), 471–481. doi :10.1016/j.jocs.2013.08.005
- Rebenitsch, L., & Owen, C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, 20(2), 101–125. doi :10.1007/s10055-016-0285-9
- Reichelt, S., Häussler, R., Fütterer, G., & Leister, N. (2010). Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays. Communication présentée au Proc. SPIE 7690, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2010 and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IV, 76900B, Orlando, Florida, USA. doi :10.1117/12.850094
- Renucci, Franck, Dumas, P., & Gaste, D. (2002). La combinaison des Sic et des Tic dans une démarche de recherche, un cheminement positif et critique (pp. 453–460). Communication présentée au Actes du XIIIe Congrès national des sciences, Marseille, France.
- Renucci, Frank. (2015). L'individu communiquant. *Hermès*, 71(1), 164–171.
- Renucci, Frank. (2017, 1 janvier). Les points de butée de la communication comme points d'appui. *Revue française des sciences de l'information et de la communication*. doi :10.4000/rfsic.2660
- Renucci, Frank, & Pelissier, M. (2013). L'esprit d'aventure, le trésor perdu des SIC. *Hermès*, 67(3), 113–121.
- Robinett, W., & Rolland, J. P. (1993). A Computational Model for the Stereoscopic Optics of a Head-Mounted Display. Dans R. A. Earnshaw, M. A. Gigante, & H. Jones, *Virtual Reality Systems* (pp. 51–75). Boston, USA : Academic Press. doi :10.1016/b978-0-12-227748-1.50013-5
- Robinson, B., Vasko, S. E., Gonnerman, C., Christen, M., ORourke, M., & Steel, D. (2016). Human values and the value of humanities in interdisciplinary research. *Cogent Arts & Humanities*, 3(1). doi :10.1080/23311983.2015.1123080
- Rodriguez, J. D., Lane, K. J., Ousler, G. W., Angjeli, E., Smith, L. M., & Abelson, M. B. (2018). Blink: Characteristics, Controls, and Relation to Dry Eyes. *Current Eye Research*, 43(1), 52–66. doi :10.1080/02713683.2017.1381270
- Roegiers, X. (2007). Les actions d'éducation ou de formation. Dans *Analyser une action d'éducation ou de formation* (pp. 19–50). (S.l.) : De Boeck Supérieur.
- Rogers, B., & Graham, M. (1979). Motion Parallax as an Independent Cue for Depth Perception. *Perception*, 8(2), 125–134. doi :10.1068/p080125
- Rolland, J. P., & Hua, H. (2005). Head-mounted display systems. *Encyclopedia of Optical Engineering*, 1–14. doi :10.1117/12.177360
- Romrell, D. (2014). Gender and Gaming: A Literature Review (pp. 170–182). Communication présentée au annual meeting of the AECT International Convention, Hyatt Regency Orange County, CA, USA.

- Rosa, A. M., Silva, M. F., Ferreira, S., Murta, J., & Castelo-Branco, M. (2013). Plasticity in the Human Visual Cortex: An Ophthalmology-Based Perspective. *BioMed Research International*, 2013, 1–13. doi :10.1155/2013/568354
- Rosenfield, M., Jahan, S., Nunez, K., & Chan, K. (2015). Cognitive demand, digital screens and blink rate. *Computers in Human Behavior*, 51(Part A), 403–406. doi :10.1016/j.chb.2015.04.073
- Rossetti, Y., Pisella, L., & McIntosh, R. D. (2017). Rise and fall of the two visual systems theory. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. doi :10.1016/j.rehab.2017.02.002
- Rotter, P. (2017). Why Did the 3D Revolution Fail?: The Present and Future of Stereoscopy [Commentary]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 36(1), 81–85. doi :10.1109/mts.2017.2654294
- Roulet, A.-L. (1868). *De l'asthénopie*. (S.l.) : Nabu Press.
- Rueda, M. R., Psychology, D. O. E., Center for Research on Mind, Brain, de Granada, U., Spain, et al. (2015). Cognitive Neuroscience of Attention. *AIMS Neuroscience*, 2(4), 183–202. doi :10.3934/neuroscience.2015.4.183
- Rushton, S. K., & Riddell, P. M. (1999). Developing visual systems and exposure to virtual reality and stereo displays: some concerns and speculations about the demands on accommodation and vergence. *Applied Ergonomics*, 30(1), 69–78. doi :10.1016/s0003-6870(98)00044-1
- Rushton, S., Mon-Williams, M., & Wann, J. P. (1994). Binocular vision in a bi-ocular world: new-generation head-mounted displays avoid causing visual deficit. *Displays*, 15(4), 255–260. doi :10.1016/0141-9382(94)90073-6
- Rößing, C. (2016). Human Visual Perception. Dans A. Terzis, *Handbook of Camera Monitor Systems*, 5 (Augmented Vision and Reality, pp. 279–312). (S.l.) : Springer International Publishing. doi :10.1007/978-3-319-29611-1_9
- Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4), 332–339. doi :10.1038/nrn1651
- Sankaranarayanan, G., Wooley, L., Hogg, D., Dorozhkin, D., Olasky, J., Chauhan, S., et al. (2018). Immersive virtual reality-based training improves response in a simulated operating room fire scenario. *Surgical Endoscopy*, 32(8), 3439–3449. doi :10.1007/s00464-018-6063-x
- Santos, B. S., Dias, P., Pimentel, A., Baggerman, J.-W., Ferreira, C., Silva, S., & Madeira, J. (2008). Head-mounted display versus desktop for 3D navigation in virtual reality: a user study. *Multimedia Tools and Applications*, 41(1), 161–181. doi :10.1007/s11042-008-0223-2
- Sawant, A. (2019). *E-Learning Virtual Reality Market Research Report- Global Forecast 2023* (No. MRFR/ICT/2937-HCRR). *Information and Communications Technology*. Market Research Future.
- Schaeffel, F. (2017). Processing of Information in the Human Visual System. Dans A. Hornberg, *Handbook of Machine Vision* (2nd éd., pp. 1–29). Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi :10.1002/9783527610136.ch1

- Scheiman, M., & Wick, B. (2014). *Clinical Management of Binocular Vision: Heterophoric, Accommodative, and Eye Movement Disorders* (4^e éd.). Philadelphia, PA, USA : LWW. doi :10.1111/opo.12161
- Schlueter, J., Baiotto, H., Hoover, M., Kalivarapu, V., Evans, G., & Winer, E. (2017). Best practices for cross-platform virtual reality development. Communication présentée au Proc. SPIE 10197, Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017, Anaheim, California, USA. doi :10.1117/12.2262718
- Schmoll, L., Veit, M., & Roy, M. (2013). Serious game et apprentissage en réalité virtuelle: résultats d'une étude préliminaire sur la mémorisation en langue étrangère. *Synergies de pays germanophones* 7. doi :10.3726/978-3-0351-0935-1/6
- Scholz, T. M. (2019). Introduction: The Emergence of eSports. Dans *eSports is Business* (pp. 1–16). (S.l.) : Palgrave Pivot, Cham. doi :10.1007/978-3-030-11199-1_1
- Schor, C. M. (1992). A Dynamic Model of Cross-Coupling Between Accommodation and Convergence: Simulations of Step and Frequency Responses. *Optometry and Vision Science*, 69(4), 258–269. doi :10.1097/00006324-199204000-00002
- Schor, C. M., & Kotulak, J. C. (1986). Dynamic interactions between accommodation and convergence are velocity sensitive. *Vision Research*, 26(6), 927–942. doi :10.1016/0042-6989(86)90151-3
- Schor, C. M., & Tsuetaki, T. K. (1987). Fatigue of accommodation and vergence modifies their mutual interactions. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 28(8), 1250–1259.
- Schor, C. M., Wood, I., & Ogawa, J. (1984). Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. *Vision Research*, 24(7), 661–665. doi :10.1016/0042-6989(84)90207-4
- Schrader, C., & Bastiaens, T. J. (2012). The influence of virtual presence: Effects on experienced cognitive load and learning outcomes in educational computer games. *Computers in Human Behavior*, 28(2), 648–658. doi :10.1016/j.chb.2011.11.011
- Schroeder, B. L., Bailey, S. K. T., Johnson, C. I., & Gonzalez-Holland, E. (2017). Presence and Usability Do Not Directly Predict Procedural Recall in Virtual Reality Training. Dans C. Stephanidis, *HCI International 2017 – Posters' Extended Abstracts. HCI 2017. Communications in Computer and Information Science*, 174 (pp. 54–61). Vancouver, BC, Canada : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-58753-0_9
- Schubert, R. S., Hartwig, J., Müller, M., Groh, R., & Pannasch, S. (2016). Are age differences missing in relative and absolute distance perception of stereoscopically presented virtual objects? (pp. 307–308). Communication présentée au Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology - VRST '16, Munich, Germany. doi :10.1145/2993369.2996334
- Scott, R. B. (2015). The body electric in the age of virtual reality and transhumanism: Forces changing the West's notions of self, identity and humanness. *Explorations in Media Ecology*, 14(3-4), 275–296. doi :10.1386/eme.14.3-4.275_1

- Segal, J. (2011). Cybernétique et théorie de la communication. Dans *Le zéro et le un: Histoire de la notion d'information au XXe siècle, 1* (pp. 191–295). Paris, France : Editions Matériologiques.
- Segura, J. (2012, 31 octobre). Ce qu'il faut retenir de la réalité virtuelle au XXè siècle. Communication présentée aux *7ème journées de l'AFRV*. Strasbourg, France.
- Segura, Á., Barandiaran, J., Moreno, A., Barandiaran, I., & Flórez, J. (2017). Improved virtual reality perception with calibrated stereo and variable focus for industrial use. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–9. doi :10.1007/s12008-017-0377-0
- Selzer, M. N., Gazcon, N. F., & Larrea, M. L. (2019). Effects of virtual presence and learning outcome using low-end virtual reality systems. *Displays*, 59, 9–15. doi :10.1016/j.displa.2019.04.002
- Shaffer, D. W., Squire, K. R., Halverson, R., & Gee, J. P. (2005). Video games and the future of learning. *Phi Delta Kappan*, 87(2), 105–111. doi :10.1177/003172170508700205
- Shang, X., Kallmann, M., & Arif, A. S. (2019). Effects of Virtual Agent Gender on User Performance and Preference in a VR Training Program. Dans K. Arai & R. Bhatia, *Advances in Information and Communication. FICC 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*, 69 (pp. 482–495). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-030-12388-8_34
- Shapiro, L. (2019). *Embodied Cognition* (2nd éd.). London, UK : Routledge. doi :https://doi.org/10.4324/9781315180380
- Sharek, D., & Wiebe, E. (2014). Measuring Video Game Engagement Through the Cognitive and Affective Dimensions. *Simulation & Gaming*, 45(4-5), 569–592. doi :10.1177/1046878114554176
- Sharples, S., Cobb, S., Moody, A., & Wilson, J. R. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2), 58–69. doi :10.1016/j.displa.2007.09.005
- Shaw, A. (2010). What Is Video Game Culture? Cultural Studies and Game Studies. *Games and Culture*, 5(4), 403–424. doi :10.1177/1555412009360414
- Sheppard, A. L., & Wolffsohn, J. S. (2018). Digital eye strain: prevalence, measurement and amelioration. *BMJ Open Ophthalmology*, 3(1), e000146. doi :10.1136/bmjophth-2018-000146
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design* (2nd éd.). San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann.
- Shibata, T. (2002). Head mounted display. *Displays*, 23(1-2), 57–64. doi :10.1016/s0141-9382(02)00010-0
- Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M., & Banks, M. S. (2011). The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*, 11(8), 1–29. doi :10.1167/11.8.11
- Shin, D. (2018). Empathy and embodied experience in virtual environment: To what extent can virtual reality stimulate empathy and embodied experience? *Computers in Human Behavior*, 78, 64–73. doi :10.1016/j.chb.2017.09.012

- Shrader-Frechette, K. (2010). Technology and Ethics. Dans C. Hanks, *Technology and Values: Essential Readings* (pp. 60–64). (S.l.) : Wiley-Blackwell.
- Siegel, C. (2014). Valeurs et représentations au cœur du processus de gamification : Approche sociocritique des symptômes d'une société du jeu total par trois de ses formes : serious games, Games for Change et artgames. *Interfaces numériques*, 2(3), 281. doi :10.25965/interfaces-numeriques.1594
- Siegel, C. (2015). La Gamification, promesse de réenchantement du monde ? Communication présentée au Colloque Homo Ludens du 21^e siècle, RIRRA 21 et LIRMM, Montpellier, France. doi :.21409/HAL-01649220
- Sievert, A., Witzki, A., & Nitzschner, M. M. (2019). Reliability and Validity of Low Temporal Resolution Eye Tracking Systems in Cognitive Performance Tasks. Dans *Human Performance Technology: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 322 (pp. 1063–1076). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-5225-8356-1.ch052
- Silva, H. (2015). La « gamification » de la vie : sous couleur de jouer ? *Sciences du jeu*, (1). doi :10.4000/sdj.261
- Skulmowski, A., & Rey, G. D. (2018). Embodied learning: introducing a taxonomy based on bodily engagement and task integration. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3(6). doi :10.1186/s41235-018-0092-9
- Slater, M. (2004). How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Anaesthesia*, 13(4), 484–493. doi :10.1162/1054746041944849
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 364(1535), 3549–3557. doi :10.1098/rstb.2009.0138
- Slater, M. (2017). Implicit Learning Through Embodiment in Immersive Virtual Reality. Dans D. Liu, C. Dede, R. Huang, & J. Richards, *Virtual, Augmented, and Mixed Realities in Education. Smart Computing and Intelligence* (pp. 19–33). (S.l.) : Springer, Singapore. doi :10.1007/978-981-10-5490-7_2
- Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 00074. doi :10.3389/frobt.2016.00074
- Smith, R. (2009). The Long History of Gaming in Military Training. *Simulation & Gaming*, 41(1), 6–19. doi :10.1177/1046878109334330
- Smith, S. P., Blackmore, K., & Nesbitt, K. (2015). A Meta-Analysis of Data Collection in Serious Games Research. Dans C. S. Loh, Y. Sheng, & D. Ifenthaler, *Serious Games Analytics* (pp. 31–55). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-05834-4_2
- Snider, M. (2019, 17 octobre). After a decade, «League of Legends remains at the top of its game. *USA Today*. [En ligne] Consulté le : 11/11/2019. Disponible sur : <https://eu.usa-today.com/story/tech/gaming/2019/10/15/online-video-game-league-legends-turns-10-looks-future/3930899002/>

- Soderstrom, N. C., & Bjork, R. A. (2015). Learning Versus Performance: An Integrative Review. *Perspectives on Psychological Science*, 10(2), 176–199. doi :10.1177/1745691615569000
- Soler, J. L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017). VR Serious Game Design Based on Embodied Cognition Theory. Dans M. Alcañiz, S. Göbel, M. Ma, M. F. Oliveira, J. B. Hauge, & T. Marsh, *Serious Games. JCSG 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10622 (pp. 12–21). (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-70111-0_2
- Sonntag, D., Orlosky, J., Weber, M., Gu, Y., Sosnovsky, S., Toyama, T., & Toosi, E. N. (2015). Cognitive Monitoring via Eye Tracking in Virtual Reality Pedestrian Environments. Communication présentée au Proceedings of the 4th International Symposium on Pervasive Displays (PerDis '15), Saarbruecken, Germany. doi :10.1145/2757710.2776816
- Souchet, A. D., Philippe, S., & Leroy, L. (2018a). Efficacité d'apprentissage en Serious Game couplé à la Réalité Virtuelle : une revue. *Les Reflets de la VIIIème Convention pédagogique portant sur Les Pédagogies actives et renouvelées au service du projet global du Groupe IGS*, 1.
- Souchet, A. D., Philippe, S., & Leroy, L. (2019a). Mesurer Charge Cognitive, Fatigue Visuelle en VR via Oculomètre et Apprentissage : revue. Communication présentée au Journées Françaises d'Informatique Graphique et de Réalité Virtuelle (J.IG.RV), Marseille, France.
- Souchet, A. D., Philippe, S., & Leroy, L. (2020a). Visual Fatigue and Cognitive Load Links and Impacts on Measurements via Eye Tracking while Learning in Virtual Reality: a Review. Communication présentée au International Journal of Human-Computer Interaction.
- Souchet, A. D., Philippe, S., Ober, F., Lévêque, A., & Leroy, L. (2018b). Eyestrain impacts on learning job interview with a serious game in virtual reality. Communication présentée au Proceedings of the 13th Journées de la Réalité Virtuelle (JRV '18), Evry, France.
- Souchet, A. D., Philippe, S., Ober, F., Lévêque, A., & Leroy, L. (2019b). Investigating Cyclical Stereoscopy Effects over Visual Discomfort and Fatigue in Virtual Reality while Learning. Communication présentée au Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'19), Beijing, China.
- Souchet, A. D., Philippe, S., Ober, F., Lévêque, A., & Leroy, L. (2019c). Jeu Sérieux en Réalité Virtuelle pour Apprendre l'Entretien d'Embauche : Expérience en Double Aveugle. Communication présentée au 3e Colloque International Game Evolution : Management et Pédagogie Ludique (CIGE 2019), Créteil, France.
- Souchet, A. D., Philippe, S., Ober, F., Lévêque, A., & Leroy, L. (2020b). Short and Long-Term Learning for Job Interview with a Serious Game in Virtual Reality: Influence of Eyestrain, Imaging and Apparatus. *Virtual Reality*, (en cours de review).
- Souchet, A. D., Philippe, S., Zobel, D., Ober, F., Lévêque, A., & Leroy, L. (2018c). Eyestrain impacts on learning job interview with a serious game in virtual reality: a randomized double-blinded study. *VRST '18 Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1–12. doi :10.1145/3281505.3281509

- Speranza, F., Tam, W. J., Renaud, R., & Hur, N. (2006). Effect of disparity and motion on visual comfort of stereoscopic images (Vol. 6055). Communication présentée au Proc. SPIE 6055, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII, San Jose, CA. doi :10.1117/12.640865
- Spitzer, M. (2014). Information technology in education: Risks and side effects. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(3-4), 81–85. doi :10.1016/j.tine.2014.09.002
- Squire, K. D. (2003). Video games in education. *Computers in Entertainment*, 2(1), 49–62. doi :10.1.1.100.8500
- Staddon, J. E. R. (2016). *Adaptive Behavior and Learning* (2nd éd.). (S.l.) : Cambridge University Press.
- Stanney, K. (1995). Realizing the full potential of virtual reality: human factors issues that could stand in the way (pp. 28–34). Communication présentée au Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium '95. doi :10.1109/vrais.1995.512476
- Stanney, K. M., Mourant, R. R., & Kennedy, R. S. (1998). Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 327–351. doi :10.1162/105474698565767
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2018). *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design* (2nd éd.). New York, USA : Routledge.
- Stark, L. W. (1995). How virtual reality works: illusions of vision in «real and virtual environments (Vol. 241, pp. 277–287). Communication présentée au Proc. SPIE 2411, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display VI, San Jose, CA, USA. doi :10.1117/12.207546
- Steinbach, M. J. (1987). Proprioceptive knowledge of eye position. *Vision Research*, 27(10), 1737–1744. doi :10.1016/0042-6989(87)90103-9
- Steinicke, F. (2016). *Being Really Virtual: Immersive Natives and the Future of Virtual Reality. Being Really Virtual: Immersive Natives and the Future of Virtual Reality*. (S.l.) : Springer, Cham. doi :10.1007/978-3-319-43078-2_10
- Steinicke, F., Bruder, G., Hinrichs, K., Kuhl, S., Lappe, M., & Willemsen, P. (2009). Judgment of natural perspective projections in head-mounted display environments (pp. 35–42). Communication présentée au Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '09, Kyoto, Japan. doi :10.1145/1643928.1643940
- Stern, J. A., Boyer, D., & Schroeder, D. (1994). Blink Rate: A Possible Measure of Fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36(2), 285–297. doi :10.1177/001872089403600209
- Sternberg, R. J., & Sternberg, K. (2016). *Cognitive psychology* (7^e éd.). (S.l.) : Wadsworth Publishing.
- Stevens, R., Jacoby, T. N., Aricescu, I. S., & Rhodes, D. P. (2017). A review of adjustable lenses for head mounted displays. *Proceedings Volume 10335, Digital Optical Technologies 2017; 103350Q*. doi :10.1117/12.2276677

- Stidwill, D., & Fletcher, R. (2011). *Normal Binocular Vision: Theory, Investigation and Practical Aspects*. UK : John Wiley & Sons.
- Stillman, B. C. (2002). Making Sense of Proprioception. *Physiotherapy*, 88(11), 667–676. doi :10.1016/s0031-9406(05)60109-5
- Stone, R. J. (2016). Getting VR Right Then and Now . . . The Indispensable Role of Human Factors and Human-Centered Design. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 25(2), 151–161. doi :10.1162/pres_a_00253
- Stone, R. J., Panfilov, P. B., & Shukshunov, V. E. (2011). Evolution of aerospace simulation: From immersive Virtual Reality to serious games (pp. 655–662). Communication présentée au Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011. doi :10.1109/rast.2011.5966921
- Storz, P., Buess, G. F., Kunert, W., & Kirschniak, A. (2011). 3D HD versus 2D HD: surgical task efficiency in standardised phantom tasks. *Surgical Endoscopy*, 26(5), 1454–1460. doi :10.1007/s00464-011-2055-9
- Stratton, S. J. (2016). Comprehensive Reviews. *Prehospital and Disaster Medicine*, 31(4), 347–348. doi :https://doi.org/10.1017/S1049023X16000649
- Sugita, N., Yamaga, T., Yoshizawa, M., Abe, M., Tanaka, A., Yambe, T., & Nitta, S.-I. (2014). Visual fatigue induced by accommodation convergence mismatch while viewing three-dimensional television. Communication présentée au 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Tokyo, Japan. doi :10.1109/gcce.2014.7031210
- Suh, A., & Prophet, J. (2018). The state of immersive technology research: A literature analysis. *Computers in Human Behavior*, 86, 77–96. doi :10.1016/j.chb.2018.04.019
- Sun, R., Wu, Y. J., & Cai, Q. (2018). The effect of a virtual reality learning environment on learners' spatial ability. *Virtual Reality*, 1–14. doi :10.1007/s10055-018-0355-2
- Sutherland, I. E. (1965). The Ultimate Display (pp. 506–508). Communication présentée au Proceedings of the IFIP Congress, NYC, NY, USA. doi :10.1.1.136.3720
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display (pp. 757–764). Communication présentée au Proceeding AFIPS '68 (Fall, part I) Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I, San Francisco, CA, USA. doi :10.1145/1476589.1476686
- Sweeney, L. E., Seidel, D., Day, M., & Gray, L. S. (2014). Quantifying interactions between accommodation and vergence in a binocularly normal population. *Vision Research*, 105, 121–129. doi :10.1016/j.visres.2014.10.007
- Sweller, J. (2011). Cognitive Load Theory. Dans H. Lam, *Psychology of Learning and Motivation*, 55 (pp. 37–76). (S.I.) : Academic Press. doi :https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8
- Symborski, C., Barton, M., Quinn, M. M., Korris, J. H., Kassam, K. S., & Morewedge, C. K. (2016). The Design and Development of Serious Games Using Iterative Evaluation. *Games and Culture*. doi :10.1177/1555412016673262

- Szostak, R. (2015). Interdisciplinary and transdisciplinary multimethod and mixed methods research. Dans S. Hesse-Biber, R. B. Johnson, & P. E. Nathan, *The Oxford Handbook of Multimethod and Mixed Methods Research Inquiry* (pp. 129–143). New York, NY, USA : Oxford University Press.
- Szycik, G. R., Mohammadi, B., Münte, T. F., & Wildt, te, B. T. (2017). Lack of Evidence That Neural Empathic Responses Are Blunted in Excessive Users of Violent Video Games: An fMRI Study. *Frontiers in Psychology*, 8. doi :10.3389/fpsyg.2017.00174
- Sørensen, S. M. D., Savran, M. M., Konge, L., & Bjerrum, F. (2016). Three-dimensional versus two-dimensional vision in laparoscopy: a systematic review. *Surgical Endoscopy*, 30(1), 11–23. doi :10.1007/s00464-015-4189-7
- Takatalo, J., Häkkinen, J., Kaistinen, J., & Nyman, G. (2009). Presence, Involvement, and Flow in Digital Games. Dans R. Bernhaupt, *Human-Computer Interaction Series* (pp. 23–46). London, UK : Springer London. doi :10.1007/978-1-84882-963-3_3
- Takatalo, J., Kawai, T., Kaistinen, J., Nyman, G., & Häkkinen, J. (2011). User Experience in 3D Stereoscopic Games. *Media Psychology*, 14(4), 387–414. doi :10.1080/15213269.2011.620538
- Tang, S., Hanneghan, M., & Rhalibi, El, A. (2009). Introduction to Games-Based Learning. Dans T. M. Connolly, M. Stansfield, & L. Boyle, *Games-Based Learning Advancements for Multi-Sensory Human Computer Interfaces: Techniques and Effective Practices*, 22 (p. 103). Hershey, PA : Information Science Reference. doi :10.4018/978-1-60566-360-9.ch001
- Tantan, O. C., Lang, D., & Boughzala, I. (2016). Learning Business Process Management through Serious Games: Feedbacks on the Usage of INNOV8. Communication présentée au 2016 IEEE 18th Conference on Business Informatics (CBI), Paris, France. doi :10.1109/cbi.2016.35
- Tashakkori, A., Teddlie, C., & Johnson, B. (2015). Mixed Methods. Dans *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 618–623). doi :10.1016/b978-0-08-097086-8.10550-1
- Tennyson, R. D., & Volk, A. (2015). Learning Theories and Educational Paradigms. Dans *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (Second Edition, pp. 699–711). doi :10.1016/b978-0-08-097086-8.92036-1
- Teranishi, S., & Yamagishi, Y. (2017). Educational Effects of a Virtual Reality Simulation System for constructing Self-Built PCs. Dans J. Johnston, (pp. 1214–1222). Communication présentée au Proceedings of EdMedia 2017, Washington, DC: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). doi :<https://www.learntechlib.org/p/178439/>
- Terzić, K., & Hansard, M. (2016). Methods for reducing visual discomfort in stereoscopic 3D: A review. *Signal Processing: Image Communication*, 47, 402–416. doi :10.1016/j.image.2016.08.002
- Terzić, K., & Hansard, M. (2017). Causes of discomfort in stereoscopic content: a review. *Computing Research Repository (CoRR)*.

Thalmann, D., Lee, J., & Thalmann, N. M. (2016). An evaluation of spatial presence, social presence, and interactions with various 3D displays (pp. 197–204). Communication présentée au Proceedings of the 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents - CASA '16, Geneva, Switzerland. doi :10.1145/2915926.2915954

The four pillars of learning. (n.d.). The four pillars of learning. www.parisinnovationreview.com.

Thon, J. N. (2009). Computer Games, Fictional Worlds, and Transmedia Storytelling: A Narratological Perspective (pp. 1–6). Communication présentée au Proceedings of the Philosophy of Computer Games Conference 2009, Oslo, Norway. doi :10.1515/9783110232424.3.276

Thorpe, S., Fize, D., & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381(6582), 520–522. doi :10.1038/381520a0

Tisseau, J. (2001). *Réalité virtuelle — Autonomie in virtuo, Unpublished habilitation à diriger les recherches*. Rennes, France : University of Rennes.

Tobias, S., & Fletcher, J. D. (2012). Reflections on "A Review of Trends in Serious Gaming". *Review of Educational Research*, 82(2), 233–237. doi :10.3102/0034654312450190

Tobias, S., Fletcher, J. D., Bediou, B., Wind, A. P., & Chen, F. (2014). Multimedia Learning with Computer Games. Dans R. E. Mayer, *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2nd éd., pp. 762–784). (S.l.) : Cambridge University Press. doi :10.1017/cbo9781139547369.037

Tozman, T., Magdas, E. S., MacDougall, H. G., & Vollmeyer, R. (2015). Understanding the psychophysiology of flow: A driving simulator experiment to investigate the relationship between flow and heart rate variability. *Computers in Human Behavior*, 52, 408–418. doi :10.1016/j.chb.2015.06.023

Trahan, M. H., Smith, K. S., & Talbot, T. B. (2019). Past, Present, and Future: Editorial on Virtual Reality Applications to Human Services. *Journal of Technology in Human Services*, 37(1), 1–12. doi :10.1080/15228835.2019.1587334

Tran, K. (2018, novembre). Why the esports audience is set to surge — and how brands can take advantage of increased fans and viewership. www.businessinsider.com. [En ligne] Consulté le : 09/07/2019. Disponible sur : <https://www.businessinsider.fr/us/the-esports-audience-report-2018-11>

Troncoso, X. G., Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2011). Vision's First Steps: Anatomy, Physiology, and Perception in the Retina, Lateral Geniculate Nucleus, and Early Visual Cortical Areas. Dans G. Dagnelie, *Visual Prosthetics* (pp. 23–57). (S.l.) : Springer US. doi :10.1007/978-1-4419-0754-7_2

Trothen, T. J. (2015). The Trans-Athlete and the Religion of Sport: Implications of Transhumanism for Elite Sports Spiritual Dimension. Dans C. Mercer & T. J. Trothen, *Religion and Transhumanism: The Unknown Future of Human Enhancement* (1^{re} éd., pp. 351–367). Santa Barbara, CA, USA : Praeger.

Turnbull, P. R. K., & Phillips, J. R. (2017). Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults. *Scientific Reports*, 7(1). doi :10.1038/s41598-017-16320-6

- Tussyadiah, I. P., Wang, D., & Jung, T. H. (2018). Virtual reality, presence, and attitude change: Empirical evidence from tourism. *Tourism Management*, *66*, 140–154. doi :10.1016/j.tourman.2017.12.003
- Ujike, H., & Watanabe, H. (2015). 3D visual fatigue: Interaction between ranges of binocular disparity and interocular crosstalk (pp. 668–669). Communication présentée au 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Osaka, Japan. doi :10.1109/gcce.2015.7398697
- Ukai, K., & Howarth, P. A. (2008). Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations. *Displays*, *29*(2), 106–116. doi :10.1016/j.displa.2007.09.004
- Urey, H., Chellappan, K. V., Erden, E., & Surman, P. (2011). State of the Art in Stereoscopic and Autostereoscopic Displays (Vol. 99, pp. 540–555). Communication présentée au Proceedings of the IEEE. doi :10.1109/jproc.2010.2098351
- Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., & Brooks, F. P. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments (pp. 359–364). Communication présentée au Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99, Los Angeles, CA, USA. doi :10.1145/311535.311589
- VR, C. D. (2019). *Charte de recommandations sur l'usage de la Réalité Virtuelle*. Paris, France : GIE VR Connection.
- Van Eck, R. (2010). *Gaming and Cognition: Theories and Practice from the Learning Sciences* (1^{re} éd.). (S.I.) : Information Science Publishing.
- Van Rooij, A. J., Schoenmakers, T. M., Vermulst, A. A., & Van De Mheen, D. (2010). Online video game addiction: identification of addicted adolescent gamers. *Addiction*, *106*(1), 205–212. doi :10.1111/j.1360-0443.2010.03104.x
- Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W., & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, *85*(4), 475–511. doi :10.3102/0034654314564881
- Vasiljevas, M., Gedminas, T., Sevchenko, A., Janciukas, M., Blazauskas, T., & Damasevicius, R. (2016). Modelling eye fatigue in gaze spelling task (pp. 95–102). Communication présentée au 2016 IEEE 12th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), Cluj-Napoca, Romania. doi :10.1109/ICCP.2016.7737129
- Veinott, E. S., Perleman, B., Polander, E., Leonard, J., Berry, G., Catrambone, R., *et al.* (2014). Is more information better? Examining the effects of visual and cognitive fidelity on learning in a serious video game. Communication présentée au 2014 IEEE Games Media Entertainment, Toronto, ON, Canada. doi :10.1109/gem.2014.7048105
- Velev, D., & Zlateva, P. (2017). Virtual Reality Challenges in Education and Training. *International Journal of Learning and Teaching*, *3*(1), 33–37.
- Veziridis, S., Karampelas, P., & Lekea, I. (2017). Learn by playing: A serious war game simulation for teaching military ethics. Communication présentée au 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, Greece. doi :10.1109/educon.2017.7942958

- Video Game History Timeline. (n.d.). Video Game History Timeline. *www.museumofplay.org*. Rochester, NY, USA. [En ligne] Consulté le : 12/05/2017. Disponible sur : <https://www.museumofplay.org/about/icheg/video-game-history/timeline>
- Vienne, C. (2013). *Understanding and Improving the Quality of Experience in 3D media perception: Accommodation/Vergence conflict in Stereopsis* (No. 2013PA05H102). Université René Descartes - Paris V.
- Vienne, C., Blondé, L., & Doyen, D. (2012). Visual fatigue versus eye-movements. *Proceedings SPIE 8288, Stereoscopic Displays and Applications XXIII*, 1–11. doi :10.1117/12.906994
- Virvou, M., & Katsionis, G. (2008). On the usability and likeability of virtual reality games for education: The case of VR-ENGAGE. *Computers & Education*, 50(1), 154–178. doi :10.1016/j.compedu.2006.04.004
- Votanopoulos, K., Brunnicardi, F. C., Thornby, J., & Bellows, C. F. (2007). Impact of Three-Dimensional Vision in Laparoscopic Training. *World Journal of Surgery*, 32(1), 110–118. doi :10.1007/s00268-007-9253-6
- Walker, A., & Leary, H. (2009). A Problem Based Learning Meta Analysis: Differences Across Problem Types, Implementation Types, Disciplines, and Assessment Levels. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 3(1). doi :10.7771/1541-5015.1061
- Walton, D., & Zhang, N. (2013). The epistemology of scientific evidence. *Artificial Intelligence and Law*, 21(2), 173–219. doi :10.1007/s10506-012-9132-9
- Wang, A.-H., Kuo, H.-T., & Huang, S. (2010). Effects of polarity and ambient illuminance on the searching performance and visual fatigue for various aged users. Communication présentée au The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering, Awaji, Japan. doi :10.1109/iccie.2010.5668318
- Wang, B., Shen, M., Wang, Y.-X., He, Z.-W., Chi, S.-Q., & Yang, Z.-H. (2019). Effect of virtual reality on balance and gait ability in patients with Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*, 33(7), 1130–1138. doi :10.1177/0269215519843174
- Wang, Yichuan, Rajan, P., Sankar, C., & Raju, P. K. (2017). Let Them Play: The Impact of Mechanics and Dynamics of a Serious Game on Student Perceptions of Learning Engagement. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 1–14. doi :10.1109/tlt.2016.2639019
- Wang, Yingtuo, Liu, T., Li, S., & Wang, J. (2016). Using electroencephalogram spectral components to assess visual fatigue caused by sustained prism-induced diplopia. Communication présentée au 2016 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Datong, China. doi :10.1109/cisp-bmei.2016.7852962
- Wann, J. P., Rushton, S., & Mon-Williams, M. (1995). Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, 35(19), 2731–2736. doi :10.1016/0042-6989(95)00018-u

- Ware, C., Gobrecht, C., & Paton, M. (1995). Algorithm for dynamic disparity adjustment. *Proc. SPIE 2409, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II*, 150–156. doi :10.1117/12.205856
- Wassila, D., & Tahar, B. (2012). Using serious game to simplify algorithm learning (pp. 1–5). Communication présentée au International Conference on Education and e-Learning Innovations. doi :10.1109/iceeli.2012.6360569
- Watson, B. A., & Hodges, L. F. (1995). Using texture maps to correct for optical distortion in head-mounted displays (pp. 172–178). Communication présentée au Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium '95, Research Triangle Park, NC, USA. doi :10.1109/vrais.1995.512493
- Webster, R. (2015). Declarative knowledge acquisition in immersive virtual learning environments. *Interactive Learning Environments*, 24(6), 1319–1333. doi :10.1080/10494820.2014.994533
- Wee, S. W., Moon, N. J., Lee, W. K., & Jeon, S. (2012). Ophthalmological factors influencing visual asthenopia as a result of viewing 3D displays. *British Journal of Ophthalmology*, 96(11), 1391–1394. doi :10.1136/bjophthalmol-2012-301690
- Weiss, P. L., & Jessel, A. S. (1998). Virtual reality applications to work. *Work*, 11(3), 277–293. doi :10.3233/WOR-1998-11305
- Welchman, A. E., Deubelius, A., Conrad, V., Bühlhoff, H. H., & Kourtzi, Z. (2005). 3D shape perception from combined depth cues in human visual cortex. *Nature Neuroscience*, 8(6), 820–827. doi :10.1038/nn1461
- WePC (2019). 2019 Video Game Industry Statistics, Trends & Data. *www.wepc.com*. [En ligne] Consulté le : 09/07/2019. Disponible sur : <https://www.wepc.com/news/video-game-statistics/>
- Whitton, N. (2010). Game Engagement Theory and Adult Learning. *Simulation & Gaming*, 42(5), 596–609. doi :10.1177/1046878110378587
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine, Reissue Of The 1961*. Cambridge, MA, USA : The MIT Press.
- Wilhelm, D., Reiser, S., Kohn, N., Witte, M., Leiner, U., Mühlbach, L., *et al.* (2014). Comparative evaluation of HD 2D/3D laparoscopic monitors and benchmarking to a theoretically ideal 3D pseudodisplay: even well-experienced laparoscopists perform better with 3D. *Surgical Endoscopy*, 28(8), 2387–2397. doi :10.1007/s00464-014-3487-9
- Wilson, K. A., Bedwell, W. L., Lazzara, E. H., Salas, E., Burke, C. S., Estock, J. L., *et al.* (2009). Relationships between game attributes and learning outcomes: Review and research proposals. *Simulation & Gaming*, 40(2), 217–266. doi :10.1177/1046878108321866
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636. doi :10.3758/bf03196322
- Winterbottom, M., Lloyd, C., Gaska, J., Williams, L., Shoda, E., & Hadley, S. (2017). Investigating Aircrew Depth Perception Standards Using a Stereoscopic Simulation Environment.

- Electronic Imaging, Stereoscopic Displays and Applications XXVIII*, 2017(5), 29–40. doi :10.2352/issn.2470-1173.2017.5.sda-354
- Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(2), 483–493. doi :10.1038/nrn1406
- Wolton, D. (2018). Information et communication : urgence théorique. *Hermès*, 3(82), 10–18.
- Wong, M. M., & Csikszentmihalyi, M. (1991). Motivation and Academic Achievement: The Effects of Personality Traits and the duality of Experience. *Journal of Personality*, 59(3), 539–574. doi :10.1111/j.1467-6494.1991.tb00259.x
- Wood, R. T. A. (2007). Problems with the Concept of Video Game "Addiction" : Some Case Study Examples. *International Journal of Mental Health and Addiction*, 6(2), 169–178. doi :10.1007/s11469-007-9118-0
- Wołoszyn, K., & Hohol, M. (2017). Commentary: The poverty of embodied cognition. *Frontiers in Psychology*, 8(845). doi :10.3389/fpsyg.2017.00845
- World Health Organization. (2018, juin). International Classification of Diseases: 6C51 Gaming disorder. *icd.who.int*. [En ligne] Consulté le : 01/07/2019. Disponible sur : <https://icd.who.int/browse11/l-m/en#/http%3a%2f%2fid.who.int%2fid%2fentity%2f1448597234>
- Wouters, P., & van Oostendorp, H. (2017). Overview of Instructional Techniques to Facilitate Learning and Motivation of Serious Games. Dans *Instructional Techniques to Facilitate Learning and Motivation of Serious Games* (pp. 1–16). doi :10.1007/978-3-319-39298-1_1
- Wouters, P., & van Oostendorp, H. (2013). A meta-analytic review of the role of instructional support in game-based learning. *Computers & Education*, 60(1), 412–425. doi :10.1016/j.compedu.2012.07.018
- Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H., & van der Spek, E. D. (2013). A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 249–265. doi :10.1037/a0031311
- Wrzesien, M., & Raya, M. A. (2010). Learning in serious virtual worlds: Evaluation of learning effectiveness and appeal to students in the E-Junior project. *Computers & Education*, 55(1), 178–187. doi :10.1016/j.compedu.2010.01.003
- Wrzesien, M., Alcañiz, M., Botella, C., Burkhardt, J.-M., Lopez, J. B., & Ortega, A. R. (2014). A Pilot Evaluation of a Therapeutic Game Applied to Small Animal Phobia Treatment. Dans S. 2014, (Vol. 8778, pp. 10–20). Communication présentée au International Conference on Serious Games Development and Applications, Berlin, Germany. doi :10.1007/978-3-319-11623-5_2
- Wu, W. H., Hsiao, H. C., Wu, P. L., & Lin, C. H. (2012a). Investigating the learning-theory foundations of game-based learning: a meta-analysis. *Journal of Computer Assisted Learning*, 28(3), 265–279. doi :10.1111/j.1365-2729.2011.00437.x
- Wu, W.-H., Chiou, W.-B., Kao, H.-Y., Hu, C.-H. A., & Huang, S.-H. (2012b). Re-exploring game-assisted learning research: The perspective of learning theoretical bases. *Computers & Education*, 59(4), 1153–1161. doi :10.1016/j.compedu.2012.05.003

- de Jong, T. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. *Instructional Science*, 38(2), 105–134. doi :10.1007/s11251-009-9110-0
- Wöpking, M. (1995). Viewing comfort with stereoscopic pictures: An experimental study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus. *Journal of the Society for Information Display*, 3(3), 101–103. doi :10.1889/1.1984948
- Wouters, P. (2016). Modeling and Worked Examples in Game-Based Learning. Dans H. van Oostendorp, *Instructional Techniques to Facilitate Learning and Motivation of Serious Games* (pp. 185–198). (S.l.) : Springer International Publishing. doi :10.1007/978-3-319-39298-1_10
- Yamada, Y., & Kobayashi, M. (2017). Detecting Mental Fatigue from Eye-Tracking Data Gathered While Watching Video. *Artificial Intelligence in Medicine. AIME 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10259, 295–304. doi :10.1007/978-3-319-59758-4_34
- Yamaguchi, S., Iyanaga, K., Sakaguchi, H., & Tanaka, T. (2017). The Substitution Effect of Mobile Games on Console Games: An Empirical Analysis of the Japanese Video Game Industry. *The Review of Socionetwork Strategies*, 11(2), 95–110. doi :10.1007/s12626-017-0014-1
- Yamine, K., & Violato, C. (2015). A meta-analysis of the educational effectiveness of three-dimensional visualization technologies in teaching anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 8(6), 525–538. doi :10.1002/ase.1510
- Yang, K. C. C. (2019). Reality-Creating Technologies as a Global Phenomenon. Dans *Cases on Immersive Virtual Reality Techniques* (pp. 1–18). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-5225-5912-2.ch001
- Yang, S.-N., Schlieski, T., Selmins, B., Cooper, S. C., Doherty, R. A., Corriveau, P. J., & Sheedy, J. E. (2012). Stereoscopic Viewing and Reported Perceived Immersion and Symptoms. *Optometry and Vision Science*, 89(7), 1068–1080. doi :10.1097/oxp.0b013e31825da430
- Young, M. F., Slota, S. T., & Lai, B. (2012a). Comments on "Reflections on 'A Review of Trends in Serious Gaming'". *Review of Educational Research*, 82(3), 296–299. doi :10.3102/0034654312456606
- Young, M. F., Slota, S., Cutter, A. B., Jalette, G., Mullin, G., Lai, B., Simeoni, Z., Tran, M., & Yukhymenko, M. (2012b). Our Princess Is in Another Castle: A Review of Trends in Serious Gaming for Education. *Review of Educational Research*, 82(1), 61–89. doi :10.3102/0034654312436980
- Yu, J. (2017). A Light-Field Journey to Virtual Reality. *IEEE MultiMedia*, 24(2), 104–112. doi :10.1109/mmul.2017.24
- Yu, X., Weng, D., Guo, J., Jiang, H., & Bao, Y. (2018). Effect of Using HMDs for One Hour on Preteens Visual Fatigue. Communication présentée au 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), Munich, Germany. doi :10.1109/ismar-adjunct.2018.00042
- Yuan, J., Mansouri, B., Pettey, J. H., Ahmed, S. F., & Khaderi, S. K. (2018). The Visual Effects Associated with Head-Mounted Displays. *International Journal of Ophthalmology and Clinical Research*, 5(2). doi :10.23937/2378-346x/1410085

- Yue, K., Wang, D., Hu, H., & Fang, S. (2018). The correlation between visual fatigue and duration of viewing as assessed by brain monitoring. *Journal of the Society for Information Display*, 26(7), 427–437. doi :10.1002/jsid.667
- Yıldırım, İ., & Şen, S. (2019). The effects of gamification on students' academic achievement: a meta-analysis study. *Interactive Learning Environments*, 49(10), 1–18. doi :10.1080/10494820.2019.1636089
- Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2018). Studying Eye Movements as a Basis for Measuring Cognitive Load. Communication présentée au Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '18), Montreal QC, Canada. doi :10.1145/3170427.3188628
- Zemblys, R., & Komogortsev, O. (2018). Developing photo-sensor oculography (PS-OG) system for virtual reality headsets (pp. 83:1–83:3). Communication présentée au Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Warsaw, Poland. doi :10.1145/3204493.3208341
- Zeri, F., & Livi, S. (2015). Visual discomfort while watching stereoscopic three-dimensional movies at the cinema. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 35(3), 271–282. doi :10.1111/opo.12194
- Zhang, L. (2019). Exploring Effects of Interactivity on Learning with Interactive Storytelling in Immersive Virtual Reality (pp. 1–8). Communication présentée au 2019 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games), Vienna, Austria. doi :10.1109/VS-Games.2019.8864531
- Zheng, L., Xie, T., & Liu, G. (2018). Affordances of Virtual Reality for Collaborative Learning. Communication présentée au 2018 International Joint Conference on Information, Media and Engineering (ICIME), Osaka, Japan. doi :10.1109/icime.2018.00011
- Zhonggen, Y. (2019). A Meta-Analysis of Use of Serious Games in Education over a Decade. *International Journal of Computer Games Technology*, 2019. doi :10.1155/2019/4797032
- Zolotaryova, I., & Plokha, O. (2016). Serious games: Evaluation of the learning outcomes. Communication présentée au 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine. doi :10.1109/tcset.2016.7452206
- Zou, B., Liu, Y., Guo, M., & Wang, Y. (2015). EEG-Based Assessment of Stereoscopic 3D Visual Fatigue Caused by Vergence-Accommodation Conflict. *Journal of Display Technology*, 11(12), 1076–1083. doi :10.1109/jdt.2015.2451087
- Zyda, M. (2005). From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, 38(9), 25–32. doi :10.1109/mc.2005.297
- de Bruin, E. J., van Run, C., Staaks, J., & Meijer, A. M. (2017). Effects of sleep manipulation on cognitive functioning of adolescents: A systematic review. *Sleep Medicine Reviews*, 32, 45–57. doi :10.1016/j.smrv.2016.02.006
- de Freitas, S. (2018). Are Games Effective Learning Tools? A Review of Educational Games. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(2), 74–84.


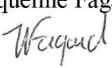
- de Freitas, S., & Liarokapis, F. (2011). Serious games: a new paradigm for education? Dans M. Ma, A. Oikonomou, & L. C. Jain, *Serious Games and Edutainment Applications* (1^{re} éd., pp. 9–23). (S.l.) : Springer-Verlag London. doi :10.1007/978-1-4471-2161-9_2
- de Freitas, S., Rebolledo-Mendez, G., Liarokapis, F., Magoulas, G., & Poulouvasilis, A. (2009). Developing an Evaluation Methodology for Immersive Learning Experiences in a Virtual World (pp. 43–50). Communication présentée au 2009 Conference in Games and Virtual Worlds for Serious Applications. doi :10.1109/vs-games.2009.41
- de Lope, R. P., Arcos, J. R. L., Medina-Medina, N., Paderewski, P., & Gutiérrez-Vela, F. L. (2017). Design methodology for educational games based on graphical notations: Designing Urano. *Entertainment Computing*, 18, 1–14. doi :10.1016/j.entcom.2016.08.005
- van Andel, K., Kater, R. B., Reints, I. M., & Spiering, M. (2019). The impact of virtual reality versus 2D pornography on sexual arousal and presence. *Computers in Human Behavior*, 97, 35–43. doi :10.1016/j.chb.2019.02.031
- Şahin, F., & Doğan, E. (2019). Being a Post-Learner With Virtual Worlds. Dans S. Sisman-Ugur & G. Kurubacak, *Handbook of Research on Learning in the Age of Transhumanism* (pp. 185–204). (S.l.) : IGI Global. doi :10.4018/978-1-5225-8431-5.ch012

ANNEXES

ANNEXE 1 : REVUE METRIQUES OCULOMETRE

Paper	Date	Purpose	Tested	Sample	Study Design	Display	Content	Tasks	Eye-tracking	Data acquisition	Exposure time	Method	Metrics										
													Eye-blinking Frequency	Duration	Pupil diameter	Fixation Duration	Frequency	Amplitude	Frequency	Duration	Saccades disconjugacy	Post saccadic disconjugate drift	Smooth pursuit
Bednarik et al.	2018	Cognitive load	Novice vs Experts	11	Between subjects	Microscope	Microsurgery exercise	penetration, needle handling and knotting	Intensify BlackMagic			Task completion, Questionnaires	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Appel et al.	2018	Cognitive load	Task difficulty and time	28	Between subjects	[Computer display] 22"	n-back task	Pressing bouton if previous letter is displayed	SMI	@ 250 Hz	12 minutes 83 secondes	Detecting n letters, pressing one or two buttons	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosch et al.	2018	Cognitive load	Speed and task difficulty	20	Between subjects	[Computer display] 22"	Target movement + audio n-back task	Following target and pressing bouton if letter displayed	SMI RED	@ 250 Hz	12 minutes 30 secondes	Following target while completing n-back, Questionnaires	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Duchowski et al.	2018	Cognitive load	Calcul accuracy and Cognitive load	13	Between subjects	[Computer display]	Mental + text entry	Counting and entering count	EyeLink 1000	?	?	Tasks and Questionnaire	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Zagermann et al.	2018	Cognitive load	Visual perception task accuracy and Cognitive Load	26	Between subjects	[Computer display] Microsoft Perceptive Pixel 550	Images	Visual perception tasks (color, shape and color + shape)	SMI	@ 120 Hz	?	Tasks and Questionnaire	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
Daniel and Kapoula	2019	Cognitive load	Control condition vs Prism condition (usual correction + 8& base-out) vs Lens condition (usual correction + -2.50D)	24	Within subjects	[Computer display]	Cognitive clinical test	Completing Stroop test	EyeSeeCam VOG	?	2.25 minutes	Reading, denomination and interference, 1 minute rest after each condition closing eyes	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
Parikh et al.	2018	Cognitive load	Accuracy based on cognitive load	10	Within subjects	[Computer display]	Texts	Word Comprehension	Tobii X2	@ 60 Hz	?	Training, Reading, Word Comprehension test	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
Jacob et al.	2018	Cognitive load	Comprehension	13	Within subjects	[Computer display]	Texts	Reading, Text Comprehension	SMI REDn Scientific	@ 60 Hz	?	Reading	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Bhavsar et al.	2018	Cognitive load	Difficulty	2	Within subjects	?	Simulation	Landing procedure	Tobii TX300	@ 120 Hz	?	Task completion x5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Yamada et al.	2017	Mental Fatigue	Paced Auditory Serial Attention Test after Watching video	18	Within subjects	[TV]	Video	Watching, Completing mPASAT	infrared EMR ACTUS	@ 60 Hz	15 minutes	Questionnaire, Watching Video, Attention Test x 2, Questionnaire Watching video	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
Hopstaken et al.	2016	Mental Fatigue	With vs Without distractors	35	Within subjects	[Computer display]	Images	Decision targeted letter or not in faces images by responding with the corresponding letter on a keyboard	SMI RED250	@ 60 Hz	1 hour 45 minutes	Task training, 1 task + Questionnaire x 3, Reward	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Diyak and Bischof	2009	Visual Fatigue	read vs work	6	Between subjects	[Computer display]	Video	Watching videos	Web-camera	?	?	Watching videos	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lee et al.	2010	Visual Fatigue	S3D vs 2D + viewing distance	24	Between subjects	[Computer display] LCD 21"	Video	Watching movie	Web-camera	15 frames/s	29.5 minutes	Questionnaire, movie for about 30 minutes and questionnaire	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cho, S.-H., & Kang, H.-B.	2012	Visual Fatigue	disparities / time / display size	20	Between subjects	[TV] LG 3D Cinema TV 55" and 27"	Video	Watching movie	SceneCamera, Arrington Research	?	3, 10 or 15 minutes	Questionnaire, viewing, Questionnaire	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Benedetto et al.	2015	Visual Fatigue	Sprintz vs regular screen	60	Between subjects	[Computer display] LCD 22" Dell P2210 + [Sprintz]	Texts	Reading	SMI RED 5	@ 500 Hz	25 minutes	Reading then Questionnaire	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zhang et al.	2015	Visual Fatigue	Polarized vs Curvate display	60	Between subjects	[TV] LCD 40" L409HBD FHD	Video	Watching videos	Gaze Intelligence	?	1 hour 45 minutes	Watching 5 minutes video then 110 minutes video, Questionnaire	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iatsun et al.	2015	Visual Fatigue	S3D vs 2D	20	Within subjects	[TV] Hyundai TriDef S465D	Video	Watching movie sequences	Tobii TX-120	= 8 ms @ 120 Hz	1 hour	10 minutes x 6 (movies), SQQ between each viewing	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Jungho Kim et al.	2018b	Visual Fatigue	Natural vs Monitor vs HMD	21	Within subjects	[Computer display] 24" Ultrason 2457 Ultra monitor / [HMD] F/VOED	Game	Playing game	FOVED	?	1 minute	No particular stimuli, game	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iatsun et al.	2013	Visual Fatigue	S3D	10	Within subjects	[TV] Hyundai TriDef S465D	Video	Watching movie sequences	Tobii TX-120	= 8 ms @ 120 Hz	1 hour	10 minutes x 6 (movies)	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
Donghyun Kim et al.	2011b	Visual Fatigue	S3D+disparity vs S3D vs 2D	2	Within subjects	[Computer display] 55" stereoscopic display	Video	Watching videos	[camera] Sony DCR-SR45, night mode	?	20 minutes	watching each movie per day	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Vienne et al.	2012	Visual Fatigue	watching (±90 vs ±45 vs 0 arcminutes) and 3D angle estimation	9	Within subjects	[Computer display]	Cross movement + RDS	Fixating a cross	EyeLink 1000	?	?	Repeating 270 times tasks (varying disparities), during 3 sessions, questionnaire (SSQ)	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Abromavicius and Serackis	2017	Visual Fatigue	S3D and comfort	12	Within subjects	[Computer display]	images (anaglyphe)	Achieve depth perception	tobii T120	@ 60 Hz	40 minutes	120 stereo images, 5 secondes rest after each image, 30 secondes rest after 40 and 80 images	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Abromavicius and Serackis	2018	Visual Fatigue	S3D and comfort	28	Within subjects	[Computer display] 17" stereoscopic display	images (anaglyphe)	Achieve depth perception	tobii T120	@ 60 Hz	40 minutes	120 stereo images, 5 secondes rest after each image, 30 secondes rest after 40 and 80 images	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
Bang et al.	2014	Visual Fatigue	S3D before vs after	15	Within subjects	[TV] 60"	Video	Watching movie	high-speed camera of 4 mega pixels	@ 50 to 60 Hz	30 minutes	pre- and post- watching S3D video measurements for 1 minute + Questionnaire	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zhou et al.	2018	Visual Fatigue	Watching images with different disparities	24	Within subjects	[TV] 47" polarized HD 3D display (LG 47LA6600)	Images	Watching	Tobii X120	?	110 seconds	Watching images for 10 seconds, Questionnaire	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Lin et al.	2018	Visual Fatigue	Parallaxes at the screen vs 20 cm vs 50 cm negative	10	Within subjects	[Projector screen] 30 ViewSonic (PJ0625)	Cubes and Balls	Clicking on the object	Tobii X2	@ 60 Hz	> 1 hour	Tasks and Rest	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Luo et al.	2016	Visual Fatigue	Flat vs curved display	27	Within subjects	[Computer display] Samsung 34" curved monitor (S34E790C) and Samsung 34" flat monitor"	Images	Finding the zebras with mouse	EyeLink II	@ 500 Hz	?	Questionnaire, Clinical tests for binocular stats, tasks, eye-tracking, Questionnaire, Clinical tests	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Park et al.	2019	Visual Fatigue and Mental Fatigue	Different display curvatures	50	Between subject	[Projector screen] 27"	Texts	Correcting texts	Acton (USA) Eye-tracker	?	15 minutes	Questionnaire, Proofreading tasks, Questionnaires	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
												Used for Cognitive Load	4	3	9	4	4	3	3	3	1	1	0
												Used for Visual Fatigue	12	4	5	4	6	1	3	2	1	1	0
												Used for both Visual Fatigue and Cognitive Load	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
												Total How many Time the Metric is Used	17	7	14	8	10	4	6	5	2	2	1

ANNEXE 2 : LETTRE APPROBATION CER PARIS DESCARTES EXP1

	UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES	Conseil d'évaluation éthique pour les recherches en santé (CERES)	
Présidente: Jacqueline Fagard	<table border="1"><tr><td>N° 2017 - 49</td></tr></table>		N° 2017 - 49
N° 2017 - 49			
PROTOCOLE : Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage et la qualité d'expérience lorsqu'exposé à l'association d'un serious game en réalité virtuelle (HMD) et la S3D (3VimpactsExp1)			
Noms du/ des chercheur(s) : Alexis Souchet, Laure Leroy			
Email pour la correspondance : asouchet@manzalab.com			
Labo/ Service: Laboratoire Paragraphe, (Paris 8) / lieu d'expérimentation : Centre de Veille et d'Innovation IDEFI- CréaTIC			
Évalué à la séance du 12/09/2017			
AVIS : Favorable			
<i>L'avis du CERES n'exonère pas des formalités réglementaires. A cet égard, il vous appartient notamment, si vous traitez des données se rapportant à un individu directement ou indirectement identifiable, de respecter la réglementation « Informatique et libertés » (CNIL) : par exemple de vous assurer de la sécurité des données, et du respect des formalités préalables prévues par la loi. Pour cela, vous pouvez solliciter les conseils du Correspondant informatique et libertés (CIL) ou du service juridique de votre université ou de votre organisme de recherche.</i>			
N°CERES : 2017_49			
Jacqueline Fagard 			
<small>email : ceres_parisdescartes@services.cnrs.fr jacqueline.fagard@gmail.com</small>			
<small>1</small>			

ANNEXE 3 : LETTRE DEPOT EXPERIENCES CNIL

CNIL.3 Place de Fontenoy - 75334 PARIS Cedex 07
T. 01 53 73 22 22 - F. 01 53 73 22 00
www.cnil.fr

RÉCÉPISSÉ

**DÉCLARATION DE CONFORMITÉ À
UNE MÉTHODOLOGIE DE
RÉFÉRENCE**

Numéro de déclaration

2120463 v 0

du 16 novembre 2017

Monsieur LECLERE Fabrice
UNIVERSITÉ PARIS 8 VINCENNES SAINT-DENIS
DIRECTION GÉNÉRALE DES SERVICES
2 RUE DE LA LIBERTÉ
93526 SAINT DENIS CEDEX**A LIRE IMPÉRATIVEMENT**

La délivrance de ce récépissé atteste que vous avez transmis à la CNIL un dossier de déclaration formellement complet. Vous pouvez désormais mettre en oeuvre votre traitement de données à caractère personnel.

La CNIL peut à tout moment vérifier, par courrier, par la voie d'un contrôle sur place ou en ligne, que ce traitement respecte l'ensemble des dispositions de la loi du 6 janvier 1978 modifiée en 2004. Afin d'être conforme à la loi, vous êtes tenu de respecter tout au long de votre traitement les obligations prévues et notamment :

- 1) La définition et le respect de la finalité du traitement,
- 2) La pertinence des données traitées,
- 3) La conservation pendant une durée limitée des données,
- 4) La sécurité et la confidentialité des données,
- 5) Le respect des droits des intéressés : information sur leur droit d'accès, de rectification et d'opposition.

Pour plus de détails sur les obligations prévues par la loi « informatique et libertés », consultez le site internet de la CNIL : www.cnil.fr.**Organisme déclarant****Nom :** UNIVERSITÉ PARIS 8 VINCENNES SAINT-DENIS**Service :** LABORATOIRE PARAGRAPHE**Adresse :** 2 RUE DE LA LIBERTÉ**Code postal :** 93526**Ville :** SAINT DENIS CEDEX**N° SIREN ou SIRET :**



199318270 00014

Code NAF ou APE :

8542Z

Tél. : 0149406789**Fax. :****Traitement déclaré****Finalité :** MR1 - Recherches dans le domaine de la santé avec recueil du consentement**Transferts d'informations hors de l'Union européenne :** NonFait à Paris, le 16 novembre 2017
Par délégation de la commissionIsabelle FALQUE PIERROTIN
Présidente

ANNEXE 4 : LETTRE APPROBATION CER PARIS DESCARTES EXP2

 UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES	CER-Paris Descartes (Comité d'Éthique de la Recherche)
Présidente: Jacqueline Fagard, présidente par procuration : Agnès Roby-Brami	N° 2018- 51- SOUCHET
PROTOCOLE : Stéréoscopie intermittente pour réduire la fatigue visuelle lors de l'apprentissage via serious game en casque de réalité virtuelle	
Noms du/ des chercheur(s) : Alexis Souchet Email pour la correspondance : asouchet@manzalab.com Labo/ Service: Paragraphe, Paris 8	
Évalué à la séance du 26/06/2018	
AVIS : Favorable	
<i>L'avis du CER-Paris Descartes n'exonère pas des formalités réglementaires. A cet égard, il vous appartient notamment, si vous traitez des données se rapportant à un individu directement ou indirectement identifiable, de respecter la réglementation « Informatique et libertés » (CNIL) : par exemple de vous assurer de la sécurité des données, et du respect des formalités préalables prévues par la loi. Pour cela, vous pouvez solliciter les conseils du correspondant informatique et libertés (CIL) ou du service juridique de votre université ou de votre organisme de recherche.</i>	
Agnès Roby-Brami, po Jacqueline Fagard	
	
CER-PD :N° 2018-51-SOUCHE	
<small>email : ceres_parisdescartes@services.cnrs.fr jacqueline.fagard@gmail.com david.brami@parisdescartes.fr</small>	

ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRE DE PROFIL

Ce questionnaire est complété via un formulaire en ligne avant l'expérimentation par chaque personne s'étant portée volontaire. Les informations demandées sont les suivantes :

Profil général :

- Êtes-vous (*un homme, une femme, neutre*) ?
- Quel est votre âge (*nombre*) ?
- Quel est votre formation et lieu d'étude ?

État du système visuel :

- Portez-vous des lunettes ou lentilles de correction de vue (*oui, non*) ?
- Quel type de défaut visuel est corrigé (*Myopie, Hypermétropie, Astigmatie, Strabisme, Autre*) ?
- Si vous connaissez les valeurs de vos corrections, merci de les indiquer ?
- Êtes-vous Presbyte (*oui, non*) ?

Rapport au jeu vidéo :

- Avez-vous ou avez-vous eu une pratique soutenue des jeux vidéo (*non, peu, plutôt, oui*) ?
- Sur quel(s) terminal(-aux) (*smartphone, console portable, console de salon, ordinateur*) ?
- À quel(s) genre(s) de jeux vidéo jouez-vous (*Aventure, Compilation, Course, FPS, Gestion / Wargames, MMORPG ou MMO, Nouveaux genres, Plate-forme, RPG, Simulation, Sport*) ?
- Vous pratiquez les jeux vidéo depuis des (*mois, années*) ?
- Indiquer le nombre de mois ou d'années (*nombre*) ?
- Quelle est la fréquence de vos sessions de jeux par semaine (*nombre*) ?
- Quelle est la durée de chaque session en heures (*nombre*) ?
- Estimez-vous être familier les serious games (*non, peu, plutôt, oui*) ?

Rapport à la VR :

- Estimez-vous être familier des casques de réalité virtuelle : CardBoard, Oculus Rift, HTC Vive Playstation VR, Samsung Gear VR... (*non, peu, plutôt, oui*) ?
- Possédez-vous un casque de réalité virtuelle (*oui, non*) ?
- Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle (*oui, non*) ?
- Pendant combien d'heures cumulées avez-vous utilisé un casque de réalité virtuelle (*nombre*) ?

Rapport au Serious Game proposé :

- Avez-vous déjà passé un entretien d'embauche (*oui, non*) ?
- Combien d'entretiens avez-vous passé (*nombre*) ?
- Combien de ces entretiens ont conduit à ce que votre candidature soit retenue (*nombre*) ?
- Avez-vous déjà suivi des cours / des formations à l'entretien d'embauche (*oui, non*) ?
- Vous êtes-vous déjà entraîné à passer un entretien d'embauche (*oui, non*) ?
- Lorsque vous devez trouver un emploi / un stage, quelle approche privilégiez-vous pour apprendre les meilleures pratiques à adopter lors d'un entretien d'embauche (*conseils de vos proches, conseils de vos enseignants, ressources internet (blogs, sites spécialisés), simulations, serious games, Je n'ai jamais appris sur ce sujet, Autres*) ?
- Seriez-vous intéressé de pouvoir accéder à un serious game afin d'apprendre les meilleures pratiques lors d'un entretien d'embauche (*non, peu, plutôt, oui*) ?
- Trouveriez-vous avantageux d'apprendre à travers un jeu vidéo plutôt qu'avec des personnes réelles (*non, peu, plutôt, oui*) ?

ANNEXE 6 : RESUME RESULTATS STATISTIQUES EXP1

	Données	Significatif	p-value	Echantillon	Test utilisé	
Acuité Stéréoscopique	pre-/post-exposition A	Oui	0.025	Apparié	Wilcoxon	
	pre-/post-exposition groupe B	Non	0.120	Apparié	Wilcoxon	
	pre-/post-exposition groupe C	Oui	0.019	Apparié	Wilcoxon	
	pre-/post-exposition groupe D	Non	0.792	Apparié	Wilcoxon	
	ΔAcuitéStéréoscopique entre groupes	Non	0.241	Indépendant	Kruskal-Wallis	
Acuité Visuelle	Acuité Visuelle pre-/post-exposition groupe A	Oui	0.002	Apparié	Wilcoxon	
	Acuité Visuelle pre-/post-exposition groupe B	Oui	0.025	Apparié	Wilcoxon	
	Acuité Visuelle pre-/post-exposition groupe C	Non	0.072	Apparié	Wilcoxon	
	Acuité Visuelle pre-/post-exposition groupe D	Non	0.129	Apparié	Wilcoxon	
	ΔAcuitéVisuelle entre groupes	Non	0.181	Indépendant	Kruskal-Wallis	
Facilité d'Accommodation	Facilité d'Accommodation pre-/post-exposition groupe A	Non	0.083	Apparié	Wilcoxon	
	Facilité d'Accommodation pre-/post-exposition groupe B	Oui	0.018	Apparié	Wilcoxon	
	Facilité d'Accommodation pre-/post-exposition groupe C	Non	0.072	Apparié	Wilcoxon	
	Facilité d'Accommodation pre-/post-exposition groupe D	Non	0.082	Apparié	Wilcoxon	
	ΔFacilitéAccommodation entre groupes	Non	0.644	Indépendant	Kruskal-Wallis	
PPA	pre-/post-exposition groupe A	Oui	<.001	Apparié	Wilcoxon	
	pre-/post-exposition groupe B	Oui	<.001	Apparié	T-Test	
	pre-/post-exposition groupe C	Oui	<.001	Apparié	Wilcoxon	
	pre-/post-exposition groupe D	Oui	<.001	Apparié	Wilcoxon	
	ΔPPA entre groupes	Oui	<.001	Indépendant	Kruskal-Wallis	
Haploscope	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.188	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.768	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.152	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.877	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe B	Non	0.187	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe B	Non	0.211	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe B	Oui	0.021	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe B	Non	0.085	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.068	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.679	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe C	Oui	0.023	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.113	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe D	Non	0.482	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe D	Non	0.377	Apparié	Wilcoxon	
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe D	Non	0.223	Apparié	Wilcoxon	
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe D	Non	0.377	Apparié	Wilcoxon	
	Δ Positive Break Point pre-/post-exposition entre groupes	Non	0.738	Indépendant	Kruskal-Wallis	
Δ Negative Break Point pre-/post-exposition	Non	0.554	Indépendant	Kruskal-Wallis		
Δ Positive Fusion Point pre-/post-exposition entre groupes	Non	0.701	Indépendant	Kruskal-Wallis		
Δ Negative Fusion Point pre-/post-exposition entre groupes	Non	0.405	Indépendant	Kruskal-Wallis		
Amplitude Vergence	Droite pre-/post-exposition groupe A	Non	1.000	Apparié	Wilcoxon	
	Centre pre-/post-exposition groupe A	Non	0.601	Apparié	Wilcoxon	
	Gauche pre-/post-exposition groupe A	Non	0.113	Apparié	Wilcoxon	
	Droite pre-/post-exposition groupe B	Non	0.326	Apparié	Wilcoxon	
	Centre pre-/post-exposition groupe B	Non	0.465	Apparié	Wilcoxon	
	Gauche pre-/post-exposition groupe B	Non	0.963	Apparié	Wilcoxon	
	Droite pre-/post-exposition groupe C	Non	0.289	Apparié	Wilcoxon	
	Centre pre-/post-exposition groupe C	Non	0.763	Apparié	Wilcoxon	
	Gauche pre-/post-exposition groupe C	Non	1.000	Apparié	Wilcoxon	
	Droite pre-/post-exposition groupe D	Non	0.951	Apparié	Wilcoxon	
	Centre pre-/post-exposition groupe D	Non	0.113	Apparié	Wilcoxon	
	Gauche pre-/post-exposition groupe D	Non	0.431	Apparié	Wilcoxon	
	ΔAmplitude Vergence Droite entre groupes	Non	0.804	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	ΔAmplitude Vergence Centre entre groupes	Non	0.544	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	ΔAmplitude Vergence Gauche entre groupes	Non	0.714	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	QoE	Inconfort visuel Global entre groupes	Oui	<.001	Indépendant	Friedman
		Presence Globale entre groupes	Oui	0.002	Indépendant	Friedman
Flow Global entre groupes		Non	0.326	Indépendant	Friedman	
Apprentissage Performance	Score E1	Non	0.346	Indépendant	ANOVA	
	Temps de Réponse E1	Oui	<.001	Indépendant	ANOVA	
	Temps de Réponse E2	Non	0.050	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	Temps de Réponse E2	Oui	<.001	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	Difference Scores E2-E1	Non	0.100	Indépendant	ANOVA	
	Difference Time E2-E1	Non	0.075	Indépendant	ANOVA	
	ΔTdr-E2-E1 groupe A	Oui	<.001	Apparié	T-Test	
	ΔTdr-E2-E1 groupe B	Oui	<.001	Apparié	T-Test	
	ΔTdr-E2-E1 groupe C	Oui	<.001	Apparié	Wilcoxon	
	ΔTdr-E2-E1 groupe D	Oui	<.001	Apparié	T-Test	
	ΔS-E2-E1 groupe A	Non	0.626	Apparié	T-Test	
	ΔS-E2-E1 groupe B	Oui	0.003	Apparié	Wilcoxon	
	ΔS-E2-E1 groupe C	Oui	<.001	Apparié	Wilcoxon	
ΔS-E2-E1 groupe D	Oui	0.079	Apparié	Wilcoxon		
Apprentissage Rétention	Score E1 (retention)	Non	0.566	Indépendant	ANOVA	
	Temps de Réponse E1 (retention)	Oui	<.001	Indépendant	ANOVA	
	Score E2 (retention)	Non	0.623	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	Temps de Réponse E2 (retention)	Oui	<.001	Indépendant	ANOVA	
	Score E3 (retention)	Non	0.453	Indépendant	ANOVA	
	Temps de Réponse E3 (retention)	Non	0.469	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	Δ Score E2-E1 (retention)	Non	0.542	Indépendant	ANOVA	
	Δ Score E3-E2 (retention)	Non	0.198	Indépendant	Kruskal-Wallis	
	Δ Temps de Réponse E2-E1 (retention)	Non	0.101	Indépendant	ANOVA	
	Δ Temps de Réponse E3-E2 (retention)	Oui	0.003	Indépendant	ANOVA	

ANNEXE 7 : RESUME RESULTATS STATISTIQUES EXP2

	Donées	Significatif	p-value	Echantillon	Test utilisé
Acuité Stéréoscopique	pre-/post-exposition groupe A	Non	0.382	Apparié	Wilcoxon
	pre-/post-exposition groupe B	Non	0.608	Apparié	Wilcoxon
	pre-/post-exposition groupe C	Non	0.588	Apparié	Wilcoxon
	Δ Acuité Stéréoscopique entre groupes	Non	0.417	Indépendant	Kruskal-Wallis
Acuité Visuelle	pre-/post-exposition groupe A	Non	1.00	Apparié	Wilcoxon
	pre-/post-exposition groupe B	Oui	0.009	Apparié	Wilcoxon
	pre-/post-exposition groupe C	Non	0.484	Apparié	Wilcoxon
	Δ Acuité Visuelle entre groupes	Oui	0.038	Indépendant	Kruskal-Wallis
Facilité d'Accommodation	pre-/post-exposition groupe A	Non	0.272	Apparié	T-Test
	pre-/post-exposition groupe B	Non	0.445	Apparié	T-Test
	pre-/post-exposition groupe C	Non	0.752	Apparié	T-Test
	Δ Facilité d'Accommodation entre groupes	Non	0.630	Indépendant	Kruskal-Wallis
PPA	pre-/post-exposition groupe A	Oui	< .001	Apparié	T-Test
	pre-/post-exposition groupe B	Oui	< .001	Apparié	T-Test
	pre-/post-exposition groupe C	Oui	< .001	Apparié	Wilcoxon
	Δ PPA entre groupes	Non	0.865	Indépendant	ANOVA
Haploscope	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.090	Apparié	Wilcoxon
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.522	Apparié	Wilcoxon
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.349	Apparié	Wilcoxon
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe A	Non	0.409	Apparié	Wilcoxon
	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe B	Oui	0.002	Apparié	Wilcoxon
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe B	Oui	< .001	Apparié	Wilcoxon
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe B	Non	0.275	Apparié	Wilcoxon
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe B	Non	0.113	Apparié	Wilcoxon
	Positive Break Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.154	Apparié	Wilcoxon
	Negative Break Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.430	Apparié	Wilcoxon
	Positive Fusion Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.133	Apparié	Wilcoxon
	Negative Fusion Point pre-/post-exposition groupe C	Non	0.277	Apparié	Wilcoxon
	Δ Positive Break Point After-Before entre groupes	Non	0.113	Indépendant	Kruskal-Wallis
	Δ Negative Break Point entre groupes	Non	0.122	Indépendant	Kruskal-Wallis
Δ Positive Fusion Point entre groupes	Non	0.151	Indépendant	Kruskal-Wallis	
Δ Negative Fusion Point entre groupes	Non	0.919	Indépendant	Kruskal-Wallis	
QoE	Inconfort Visuel Global entre groupes	Oui	0.003	Indépendant	Friedman
	Présence Globale entre groupes	Non	0.119	Indépendant	Friedman
	Flow Global entre groupes	Oui	< .001	Indépendant	Friedman
Apprentissage Performance	Score E1	Oui	0.034	Indépendant	ANOVA
	Temps de Réponse E1	Non	0.595	Indépendant	Kruskal-Wallis
	Score E2	Oui	0.031	Indépendant	Kruskal-Wallis
	Temps de Réponse E2	Non	0.935	Indépendant	Kruskal-Wallis
	Δ Scores E2-E1	Non	0.760	Indépendant	ANOVA
	Δ Temps de Réponse E2-E1	Non	0.643	Indépendant	ANOVA
	Δ Temps de Réponse E1-E2 groupe A	Oui	< .001	Apparié	Wilcoxon
	Δ Temps de Réponse E1-E2 groupe B	Oui	< .001	Apparié	T-Test
	Δ Temps de Réponse E1-E2 groupe C	Oui	< .001	Apparié	Wilcoxon
	Δ Score E1-E2 groupe A	Oui	< .001	Apparié	Wilcoxon
Δ Score E1-E2 groupe B	Oui	0.012	Apparié	Wilcoxon	
Δ Score E1-E2 groupe C	Oui	0.001	Apparié	Wilcoxon	
Apprentissage Rétention	Score E3-E2 groupe A	Oui	0.039	Apparié	T-Test
	Score E3-E2 groupe B	Non	0.70	Apparié	Wilcoxon
	Score E3-E2 groupe C	Oui	0.002	Apparié	T-Test
	Δ Score E3-E2	Non	0.071	Indépendant	ANOVA
	Temps de Réponse E3-E2 groupe A	Oui	0.021	Apparié	T-Test
	Temps de Réponse E3-E2 groupe B	Non	0.390	Apparié	Wilcoxon
	Temps de Réponse E3-E2 groupe C	Oui	0.05	Apparié	Wilcoxon
	Δ Temps de Réponse E3-E2	Non	0.57	Indépendant	ANOVA

ANNEXE 8 : RESUME PROTOCOLE EXP3

Objectif du projet

Cette expérience **pilote** propose de mesurer la fatigue visuelle et la charge cognitive via oculomètre en Réalité Virtuelle (VR) lors de tâches d'apprentissage (assemblage des pièces d'un compacteur). Le but est de déterminer leur impact sur la performance d'apprentissage dans un contexte écologique, la viabilité des mesures, les liens entre fatigue visuelle et charge cognitive.

Type de données recueillies

Données Physiologiques : taille de la pupille, nombre de clignement des yeux, rythme cardiaque.

Données Comportementales : nombre erreurs, nombre bonnes réponses, temps de réponse.

Données Questionnaires : profil, présence, flow, inconfort visuel, charge cognitive subjective, Anxiété et Conscience du Stress (échelles de likert)

Environnement virtuel d'apprentissage

Sanofi Compacteur : tâches d'assemblage de pièces sur une machine (compacteur). Apprentissage procédurale.

Hypothèses générales

H1 La fatigue visuelle est différente entre une imagerie stéréoscopique (S3D) et une imagerie bi-oculaire (2D)

H2 La fatigue visuelle est différente entre des tâches d'apprentissage procédurales et ces mêmes tâches avec l'ajout d'opérations arithmétiques à compléter (multiplications)

H3 La charge cognitive est différente entre une imagerie stéréoscopique (S3D) et une imagerie bi-oculaire (2D)

H4 La charge cognitive est différente entre des tâches d'apprentissage procédurales et ces mêmes tâches avec l'ajout d'opérations arithmétiques à compléter (multiplications)

H5 Fatigue visuelle et Charge cognitive augmentent fonction du temps d'exposition

H6 La fatigue visuelle et charge cognitive sont covariantes

H7 Plus la fatigue visuelle et/ou la charge cognitive sont élevées moins les Performances d'apprentissage sont élevée (bonnes réponses et temps de résolution des tâches)

H8 Plus la charge cognitive est élevée, plus la qualité d'expérience est évaluée basse

H9 Plus la fatigue visuelle est élevée, plus la qualité d'expérience est évaluée basse

H10 Les sujets anxieux et stressés ont une charge cognitive plus fluctuante

Conditions expérimentales

Condition 1 : affichage bi-oculaire (les deux mêmes images sans relief sur chaque écran du casque de réalité virtuelle)

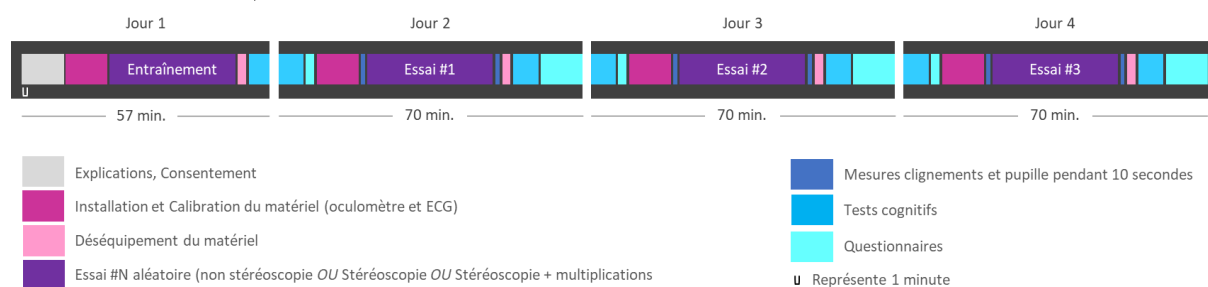
Condition 2 : affichage stéréoscopique (deux images différentes, avec une parallaxe, sur chaque écran du casque de réalité virtuelle créant l'effet de relief : comme au cinéma 3D)

Condition 3 : affichage stéréoscopique avec l'ajout de tâche de résolution de multiplications.

Matériel et outils utilisés

Matériel	Description	Administration
HTC Vive (casque VR)	https://www.tobii.com/product-listing/vr-integration/	Port sur tête
SANOVI Compacteur (simulation VR)	vidéo montrant l'environnement virtuel	Affiché dans casque VR
Oculomètre TOBII	https://www.tobii.com/fr/domaine-dapplication/virtual-reality/	Intégré casque VR
Bittium Faros 180 (ECG, Fréquence cardiaque)	https://www.bittium.com/medical/bittium-faros	Posé via ceinture thoracique
Deary–Liewald Reaction Time Task	https://www.psychtoolkit.org/experiment-library/deary_liewald.html	PC + clavier
Corsi Block Tapping Task	https://www.psychtoolkit.org/experiment-library/corsi.html	PC + souris
Questionnaires Profil + Qualité d'Expérience : voir Annexe jointe	Présence : Multimodal Presence Scale » de Makransky <i>et al.</i> , 2017 ; Flow : « Flow Short Scale » de Rheinberg <i>et al.</i> , 2008 ; Inconfort Visuel : Questionnaire de Zeri et Livi, 2015 ; Charge Cognitive Subjective : NASA-Task Load index ; Conscience Stress : « Freiburg Mindfulness Inventory » de Trousselard <i>et al.</i> , 2010 ; Anxiété : State-Trait Anxiety Inventory de Gauthier et Bouchard, 1993.	Navigateur web, Google Form & PC
Jamovi (statistiques)	https://www.jamovi.org/	
R (statistiques, graphs)	https://www.r-project.org/	

Déroulé de l'expérience



Participants et critères inclusion/exclusion

10 participants (design intra-sujet). Nombre déterminé via le logiciel **Gpower** pour réaliser des ANOVA, ANCOVA et MANOVA en tests pilotes :

Analysis: A priori: Compute required sample size ; Input: Effect size $f = 0.25$; α err prob = 0.05 ; Power ($1-\beta$ err prob) = 0.80 ; Number of groups = 3 ; Number of measurements = 30 ; Corr among rep measures = 0.5 ; Nonsphericity correction $\epsilon = 1$; Output: Noncentrality parameter $\lambda = 33.7500000$; Critical F = 1.5327964 ; Numerator df = 29.0000000 ; Denominator df = 174 ; **Total sample size = 9** ; Actual power = 0.9010483

Critères d'inclusion :

- Tranche d'âge : 18 – 39 ans
- Sans presbytie (pour assurer la comparaison de populations homogènes avec 2 précédentes expériences)
- Etudiants et/ou salariés dans le domaine du développement informatique, la psychologie, le jeu vidéo et le multimédia : exclusivement de l'entreprise Manzalab
- Niveau d'éducation : Bac +2 et plus (pour assurer la comparaison de populations homogènes avec 2 précédentes expériences)
- Niveau français : B1 à C2 (pour garantir la bonne compréhension des instructions audio d'assemblage en Français dans la simulation).

Critères de non-inclusion :

- Personnes avec troubles importants de la vision liés à une pathologie
- Personnes avec handicap physique (interactions dans l'espaces et déplacements nécessaires)

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : « Boucle perception, décision, action » d'après Fuchs <i>et al.</i> , 2006	28
Figure 2 : Schéma technocentrique d'Immersion et d'Interaction d'après Fuchs <i>et al.</i> , 2006	28
Figure 3 : Schéma anthropocentrique de la perception du monde virtuel de l'homme, d'après Fuchs <i>et al.</i> , 2006	29
Figure 4 : Exemples de HMDs	32
Figure 5 : Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia adapté d'après Mayer	39
Figure 6 : Schéma anatomie de l'œil humain, © www.institutdeloeil.com	53
Figure 7 : Schéma des muscles de l'œil humain (vue latérale droite)	54
Figure 8 : Action des muscles oculomoteurs, œil au repos	54
Figure 9 : Système visuel humain et ses voies, réinterprété	55
Figure 10 : Cartographie de l'aire de la vision, © tpeillusion.webnode.fr	56
Figure 11 : Temps de traitement de l'information visuelle selon (King, 2013)	57
Figure 12 : Classification des indices pour la perception de la profondeur d'après Fuchs	58
Figure 13 : Schéma efficacité (en seuil de profondeur) des neuf principaux indices de perception de la profondeur	59
Figure 14 : Lumières et ombres, sphères sur échiquier, extrait de Pascal Mamassian et Goldstein et Brockmole (2016, p.231).....	60
Figure 15 : Interposition, l'ellipse est perçue devant le rectangle donc plus proche	60
Figure 16 : Taille relative, la pomme la plus petite est perçue comme la plus éloignée.....	61
Figure 17 : Lorsque les éléments sont éloignés, la texture est moins nette et les joints sont perçus comme se rapprochant, d'après Leroy (2016, p. 16).....	61
Figure 18 : Perspective cavalière, arrêtes du cube dans l'axe parallèles ; Perspective artistique, arrêtes du cube vers point de fuite.....	62
Figure 19 : Illusion de Ponzo	62
Figure 20 : Démonstration de la Variation de visibilité	63
Figure 21 : Parallaxe de mouvement.....	63
Figure 22 : Cercle de Vieth-Müller, librement adapté à partir de Devisme (2008, p.32)	64
Figure 23 : Aire de Panum, représentation selon Neveu (2008, p.13).	65
Figure 24 : Vergence, différents mouvements pour aligner les axes optiques selon la distance de l'objet regardé	66
Figure 25 : Mécanisme d'accommodation.....	67
Figure 26 : Distance du point le plus proche auquel un humain peut accommoder selon son âge d'après (Goldstein & Brockmole, 2016)	68
Figure 27 : Interaction entre Accommodation et Vergence	69
Figure 28 : Lien croisé entre Accommodation et Vergence.....	69
Figure 29 : Principes de génération d'une image stéréoscopique pour HMD	73
Figure 30 : Parallaxes positives en HMD	74
Figure 31 : Parallaxes nulles en HMD	75
Figure 32 : Parallaxes négatives en HMD.....	75
Figure 33 : En HMD, stéréoscopie avec parallaxes négatives (a) et positives (b).	76

Figure 34 : Comparaison vision binoculaire naturelle et en HMD avec stéréoscopie	81
Figure 35 : Zones de confort	82
Figure 36 : Confort en affichage stéréoscopique selon la Fréquence spatiale et la Disparité d'après Perrin (1998).....	83
Figure 37 : 5 solutions de HMD avec Oculomètre disponibles en mai 2019.....	86
Figure 38 : TNO Test	99
Figure 39 : Test de Schober dans l'application Smartoptometry.....	99
Figure 40 : Haploscope déployé sur tablette	100
Figure 41 : Flipper Lens Test déployé sur tablette.....	100
Figure 42 : Donder's Push-Up Test.....	101
Figure 43 : Test d'acuité visuelle E de Raskin.....	101
Figure 44 : Smart Optometry © version Tablette (publicité).....	102
Figure 45 : Sélection d'un avatar dans Mon entretien d'embauche.....	106
Figure 46 : Défilé pour la lecture de l'offre dans Mon entretien d'embauche	107
Figure 47 : Compétences prédéfinies équivalent à un CV dans Mon entretien d'embauche .	107
Figure 48 : Lecture du site web de l'entreprise (4 images).....	108
Figure 49 : Acte I - Discussion avec un ami dans Mon entretien d'embauche	109
Figure 50 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l'entreprise, une mauvaise réponse a été choisie, la boîte se colore en rouge	109
Figure 51 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l'entreprise, le temps limité est représenté par une barre bleue qui décroît	110
Figure 52 : Acte II – Discussion avec la recruteuse de l'entreprise, une barre d'appréciation représente la perception de la recruteuse	110
Figure 53 : Acte III – Bilan de l'entretien avec le coach (agent virtuel) après l'entretien.....	111
Figure 54 : Samsung Gear VR © Samsung.....	111
Figure 55 : Résumé des conditions expérimentales Exp1	128
Figure 56 : Définition de la distance inter-caméras d'après le Δ max de disparité rétinienne confortable en stéréoscopie	129
Figure 57 : Carte d'application de la disparité rétinienne calculée.....	132
Figure 58 : Schéma déroulé de l'Expérience 1	133
Figure 59 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil Exp1	134
Figure 60 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil entretien d'embauche Exp1. .	135
Figure 61 : Exp1, boîtes à moustache différence pre- et post-exposition d'Acuité visuelle dans chaque groupe	139
Figure 62 : Exp1, boîtes à moustache différence pre- et post-exposition de PPA dans chaque groupe.....	141
Figure 63 : Exp1, boîtes à moustache différence de Δ PPA entre les groupes.....	142
Figure 64 : Exp1, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre premier (E1) et second (E2) essai dans chaque groupe	146
Figure 65 : Exp1, boîtes à moustache différence de Scores en jeu (rétention) entre les 3 essais dans chaque groupe	148
Figure 66 : Exp1, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre les 3 essais dans chaque groupe	149

Figure 67 : Exp1, boîtes à moustache différence de $\Delta TdR-E3-E1$ et $\Delta TdR-E3-E2$ entre groupes.	150
Figure 68 : Résumé des conditions expérimentales Exp2.....	156
Figure 69 : schéma d'activation stéréoscopie cyclique	157
Figure 70 : Schéma déroulé de l'Expérience 2	158
Figure 71 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil Exp2	159
Figure 72 : Schéma de répartition des réponses au questionnaire de profil entretien d'embauche Exp2	159
Figure 73 : Exp2, boîtes à moustache différence d'acuité stéréoscopique entre pre- et post-exposition dans chaque groupe	161
Figure 74 : Exp2, boîtes à moustache différence ΔAS entre les groupes.....	162
Figure 75 : Exp2, boîtes à moustache différence d'acuité visuelle entre pre- et post-exposition dans chaque groupe	163
Figure 76 : Exp2, boîtes à moustache différence ΔAV entre les groupes.....	164
Figure 77 : Exp2, boîtes à moustache différence de PPA entre pre- et post-exposition dans chaque groupe	165
Figure 78 : Exp2, boîtes à moustache différence ΔPPA entre les groupes	166
Figure 79 : Exp2, boîtes à moustache différence Scores en jeu premier (E1) et second (E2) essais dans chaque groupe.....	169
Figure 80 : Exp2, boîtes à moustache différence Temps de Réponse premier (E1) et second (E2) essais dans chaque groupe.....	170
Figure 81 : Exp2, boîtes à moustache différence Scores en jeu chacun des 3 essais (rétention) dans chaque groupe	172
Figure 82 : Exp2, boîtes à moustache différence de Temps de Réponse entre les 3 essais dans chaque groupe	174
Figure 83 : Exp2, boîtes à moustache différence de Présence global entre groupes.....	176
Figure 84 : Exp2, boîtes à moustache différence de Flow global entre groupes.....	176
Figure 85 : Exp2, boîtes à moustache différence d'Inconfort visuel global entre groupes....	177
Figure 86 : Divisions corticales du cerveau humain	182

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Questions de recherche sur le jeu vidéo et les serious games	17
Tableau 2 : Questions de recherche sur la réalité virtuelle et son usage pour apprendre	17
Tableau 3 : Questions de recherche sur la combinaison réalité virtuelle et serious game	18
Tableau 4 : Questions de recherche sur la combinaison réalité virtuelle et serious game	18
Tableau 5 : Questions de recherche sur les sensations et perceptions des yeux humains	52
Tableau 7 : Questions de recherche sur effets secondaires et la fatigue visuelle en VR	78
Tableau 7 : Facteurs induisant le cybersickness en Réalité Virtuelle selon Davis	79
Tableau 8 : Normes cliniques des mesures optométriques	102
Tableau 9 : Items de la Multimodal Presence Scale par Makransky <i>et al.</i>	103
Tableau 10 : Items du questionnaire Flow Short Scale de Rheinberg, Vollmeyer et Enseger	104
Tableau 11 : Items du questionnaire d'inconfort visuel par Zeri et Livi	104
Tableau 12 : Expérience 1, résultat de la répartition aléatoire des sujets par condition	136
Tableau 13 : Expérience 1, répartition sujets restants pour rétention	147
Tableau 14 : Expérience 2, résultat de la répartition aléatoire des sujets par condition	160
Tableau 15 : Expérience 2, répartition sujets restants pour rétention	171