



HAL
open science

Effets de la réalité augmentée sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale

Mathilde Drouot

► **To cite this version:**

Mathilde Drouot. Effets de la réalité augmentée sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2021. Français. NNT : 2021IMTA0275 . tel-03508523

HAL Id: tel-03508523

<https://theses.hal.science/tel-03508523>

Submitted on 3 Jan 2022

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE MINES-TELECOM ATLANTIQUE
BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE - IMT ATLANTIQUE
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Signal, Image, Vision*

Par

Mathilde DROUOT

Effets de la réalité augmentée sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale

Thèse présentée et soutenue à Brest, le 26/11/2021
Unité de recherche : Département Optique IMT Atlantique, LaTIM INSERM U1101
Thèse N° : 2021IMTA0275

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Marie Burkhardt Professeur, Université Gustave Eiffel
Bernard Kress Directeur hardware XR, Google

Composition du Jury :

Président :	Pascal Mamassian	Professeur, Université Paris Descartes
Rapporteur :	Jean-Marie Burkhardt	Professeur, Université Gustave Eiffel
Rapporteur :	Bernard Kress	Directeur hardware XR, Google
Dir. de thèse :	Jean-Louis de Bougrenet	Professeur, IMT Atlantique
Co-Dir. de thèse :	Vincent Nourrit	Maître de conférences, IMT Atlantique
Encadrante :	Nathalie Le Bigot	Maître de conférences, Université de Bretagne Occidentale

Invité :
Emmanuel Bricard Directeur des systèmes d'information, elm.leblanc SAS

REMERCIEMENTS

Réaliser une thèse n'est pas un long fleuve tranquille et si j'ai pu finir la mienne, c'est grâce à un certain nombre de personnes bienveillantes qui m'ont entourée, je tiens à les remercier de m'avoir aidée.

J'adresse mes premiers remerciements à Nathalie Le Bigot. Nathalie, je te remercie chaleureusement d'avoir accepté de m'encadrer pendant cette thèse. Je te suis très reconnaissante pour ton investissement, tes conseils avisés, ton soutien et ta bonne humeur. Merci pour tes qualités tant professionnelles qu'humaines, que l'on retrouve rarement ensemble et qui m'ont permis d'apprendre énormément, d'évoluer, mais surtout de mener cette thèse à son terme dans les meilleures conditions.

Merci à mes directeurs Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye et Vincent Nourrit pour leur encadrement, leur conseils et relectures lors de la rédaction de mon manuscrit, ainsi que pour l'autonomie qu'ils m'ont laissé dans la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier Jean-Marie Burkhardt, Bernard Kress et Pascal Mamassian pour avoir accepté d'évaluer mon manuscrit et de faire partie de mon jury de soutenance, mais également pour leurs analyses approfondies, leurs remarques avisées et constructives sur mon travail.

Je remercie également Johanne Bolloc'h et Jade Dumont pour leur aide dans les passations de mes expériences. Merci à Bertrand Charbonnier, Traian Lavric et Jean-Baptiste Lamour pour leur travail important de développement des interfaces indispensables à la réalisation de mes études.

Merci à tous les étudiants et collègues de l'IMT ou d'elm qui ont accepté de participer à mes différentes études.

Merci à Soukaina, ma co-bureau et amie depuis le début, qui pendant ces trois années a été une véritable alliée, m'a beaucoup soutenue, conseillée, écoutée. Tous ces moments au bureau et en dehors resteront des supers souvenirs. Petit clin d'œil à quelques collègues du département optique avec qui j'ai partagé de très bons moments au bureau : Abir, Julien, Luis, Sabrina, Jennifer.

Je remercie aussi tous mes amis, les membres de *vamos à la playa*, les *6 de toujours*, *MOLN* et *Cabron* avec qui j'ai passé trois années superbes à Brest. À mes grands amis Carlos, Sonia, Lucas et Nathalie, pour votre enthousiasme et votre joie de vivre qui ont égayé mes trois ans de thèse, *avec tout le respect*, merci !

À celui qui partage mon quotidien, Oscar, je te remercie pour ta présence, ton soutien, ton écoute et tes conseils. Merci de m'avoir supportée chaque jour, même pendant les confinements.

Enfin, il n'y a pas de mots pour dire à quel point je remercie ma famille et plus particulièrement mes parents. Vous avez toujours été présents pour m'encourager et me soutenir dans mes choix et me guider dans les moments de doute. Merci pour tous vos conseils et pour le temps que vous avez passé à relire mon manuscrit. C'est grâce à vous que j'ai pu réaliser mes études et je vous dois toutes mes réussites, merci.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	vii
Liste des tables	x
Liste des acronymes	xii
Introduction.....	1
Chapitre 1 : La réalité augmentée	4
1.1 Définitions de la réalité augmentée	5
1.2 Les dispositifs de réalité augmentée	6
1.2.1 Les différents systèmes de restitution de réalité augmentée.....	6
1.2.2 Les lunettes de réalité augmentée.....	12
1.2.3 Le Microsoft HoloLens.....	14
1.3 Les secteurs d'application de la réalité augmentée.....	15
1.4 Conclusion	16
Chapitre 2 : Impact de la réalité augmentée sur la vision binoculaire	18
2.1 Le système oculomoteur	19
2.1.1 L'œil.....	19
2.1.2 Les mécanismes du système oculomoteur	20
2.2 Problématiques oculomotrices imposées par l'utilisation de la RA	24
2.2.1 Le conflit accommodation-vergence	24
2.2.2 La rivalité focale	26
2.2.3 La rivalité binoculaire.....	27
2.3 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel.....	27
2.3.1 Définitions.....	27
2.3.2 Méthodes de mesure de la fatigue visuelle et l'inconfort visuel.....	28
2.3.3 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel provoqués par les dispositifs stéréoscopiques.....	29
2.3.4 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel en RA.....	30
2.4 Problématique.....	31
2.5 Etude 1 - Effet de la RA sur la vision binoculaire : évaluation de la fatigue visuelle et de l'inconfort visuel.....	32
2.5.1 Introduction	32
2.5.2 Méthode	34
2.5.3 Résultats.....	39
2.5.4 Discussion	44
2.5.5 Conclusion.....	46
2.6 Étude 2 - Effet de la RA sur la vision binoculaire chez une population à risque	47

2.6.1	Introduction	47
2.6.2	Méthode	48
2.6.3	Résultats	49
2.6.4	Discussion	50
2.6.5	Conclusion.....	51
2.7	Conclusion générale	52
Chapitre 3 : Impact de la réalité augmentée sur l'attention visuelle.....		54
3.1	Le système visuel	55
3.1.1	La rétine et les photorécepteurs.....	55
3.1.2	Les voies visuelles et aires cérébrales.....	56
3.2	L'attention visuelle.....	58
3.2.1	Définition de l'attention.....	58
3.2.2	L'attention visuo-spatiale	59
3.2.3	Problématiques attentionnelles en RA.....	61
3.3	Problématique.....	63
3.4	Étude 3 - Impact du context et distance switching en RA sur l'attention visuelle.....	65
3.4.1	Introduction	65
3.4.2	Méthode	67
3.4.3	Résultats	71
3.4.4	Discussion	74
3.4.5	Conclusion.....	76
3.5	Étude 4 - Évaluation de l'orientation spatiale de l'attention en 3D en RA ..	77
3.5.1	Introduction	77
3.5.2	Méthode	79
3.5.3	Résultats	82
3.5.4	Discussion	86
3.5.5	Conclusion.....	88
3.6	Conclusion générale	89
Chapitre 4 : Réalité augmentée sur une ligne d'assemblage : efficacité et charge mentale.....		91
4.1	La réalité augmentée pour l'assemblage industriel : quelle efficacité ?	93
4.1.1	Évaluation de l'efficacité.....	99
4.1.2	Limites méthodologiques des études réalisées.....	102
4.2	La charge mentale	106
4.2.1	Définition de la charge mentale et de la charge cognitive	106
4.2.2	Théorie de la charge cognitive.....	108
4.2.3	Méthodes de mesures de la charge mentale	109
4.3	Problématique.....	114

4.4	Etude 5 - Utilisation de la RA sur une ligne d'assemblage : Évaluation de l'efficacité et de la charge mentale	115
4.4.1	Méthode	117
4.4.2	Résultats	122
4.4.3	Discussion	125
4.4.4	Conclusion.....	129
4.5	Conclusion générale	130
	Conclusions, recommandations et perspectives.....	132
	Bibliographie.....	140
	Annexes	170

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Continuum Réalité-Virtualité, dans Milgram & Kishino (1994).	5
Figure 2 - Illustration de la différence entre réalité diminuée et médiatisée www.networkworld.com (dernière consultation le 28/05/2021).	6
Figure 3 - Exemple de dispositifs de réalité augmentée portés sur la tête, le Microsoft HoloLens 2 (gauche) et le Magic leap one (droite), https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens (dernière consultation le 16/11/2020).	7
Figure 4 - Exemple de dispositifs tenus à la main utilisés à des fins de recherche, une tablette (gauche) (Lucignano & Dillenbourg, 2017) © [2017] IEEE et un smartphone (droite) (Min et al., 2020).	8
Figure 5 - Exemple de dispositifs localisés spatialement dans l'environnement, utilisés en laboratoire (gauche) (Yang et al., 2019) et sur des lignes d'assemblages (droite) (Bode, 2019).	9
Figure 6 - Exemple de symbologie utilisée dans les HUD (Ertem, 2005) © [2005] IEEE.9	
Figure 7 - Illustration schématique des systèmes transparents (gauche) et opaques (droite).....	10
Figure 8 - Exemple de systèmes de RA projectifs portés sur la tête (Hua & Gao, 2007; Kade et al., 2015).	11
Figure 9 - Dispositif <i>pick-by-vision</i> , utilisant le Microvision Nomad ND2000 (Schwerdtfeger et al., 2009) © [2009] IEEE.....	14
Figure 10 - Le Microsoft HoloLens version 1 (gauche), architecture technique de l'affichage et des capteurs (droite). Photographies de Microsoft, disponibles sur https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/	14
Figure 11 - Le Microsoft HoloLens version 2. https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/	15
Figure 12 - Schéma de l'anatomie de l'œil humain, https://commons.wikimedia.org/ (dernière consultation le 04/06/2021).	19
Figure 13 - Illustration de la notion de divergence (gauche) lorsque l'objet s'approche de l'observateur et de convergence (droite) lorsque l'objet s'éloigne de l'observateur. L'angle de vergence est représenté en bleu.....	20
Figure 14 - Focalisation d'un rayon lumineux sur la rétine par le cristallin en vision de loin (haut) et de près (bas) https://www.charllaas.com/ (dernière consultation le 04/06/2021).	21

Figure 15 - Réponse accommodative en fonction du stimulus accommodatif.	22
Figure 16 - Interaction entre la réponse de vergence et d'accommodation.	24
Figure 17 - Illustration du conflit accommodation-vergence dans les dispositifs stéréoscopiques : conflit négatif (au milieu), conflit positif (à droite). Adaptée de Frey et al., (2014).....	25
Figure 18 - Illustration de la limite du système accommodatif, qui ne peut accommoder qu'à une seule profondeur à la fois. Lorsque l'arbre est net, la maison est floue et inversement. (Schowengerdt & Seibel, 2006).....	26
Figure 19 - Poste d'assemblage de composant dans l'usine elm.leblanc. Les instructions papiers (en haut à gauche de l'image) seront remplacées par des instructions en réalité augmentée.....	33
Figure 20 - Exemples de modèles de Lego à assembler.	34
Figure 21 - Test de stéréovision avec le Binoculus et les lunettes 3D Eyes3Shut (Espace Arago - IMT Atlantique).....	36
Figure 22 - Test de disparité : planche de test (gauche) et lunettes anaglyphes (droite).	36
Figure 23 -Participant utilisant l'interface virtuelle dans la condition RA. Afin de représenter ce que les participants voient dans l'HoloLens, une simulation de l'interface RA a été ajoutée à l'image.	38
Figure 24 - Scores moyens d'acuité stéréoscopique en secondes d'arc, en condition RA et contrôle, avant et après la tâche d'assemblage. Les barres d'erreur représentent l'écart type. ** différence significative à 0.01.....	41
Figure 25 - Scores moyens de vision floue (a), yeux irrités (b), et maux de tête (c), en condition RA et contrôle, avant et après la tâche d'assemblage. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.....	43
Figure 26 - Photographie d'une coupe du fond de la rétine http://kezako.unisciel.fr/ (dernière consultation 06/08/2020).	55
Figure 27 - Schéma de la structure cellulaire de la rétine, indiquant le trajet de la lumière et du traitement des informations visuelles, © (Léger, 2014)	56
Figure 28 - Schéma de l'organisation fonctionnelle des différentes voies visuelles. (Purves et al., 2019).....	57
Figure 29 - Aires visuelles et voies ventrale et dorsale. http://vignan.srikanthan.free.fr/ (dernière consultation 18/03/2021).	57
Figure 30 - L'utilisation de Microsoft guides 365 implique de porter son attention de la structure d'assemblage (à l'avant), vers l'interface des instructions (au milieu), puis vers	

les bacs contenant les pièces à saisir (à l'arrière). https://dynamics.microsoft.com/fr-fr/mixed-reality/guides/ (dernière consultation 18/05/2021).	61
Figure 31 - Exemple d'une paire de matrices <i>différentes</i> : des cadres rouges ont été ajoutés pour aider le lecteur à identifier la différence entre les matrices.	68
Figure 32 - Illustration des quatre conditions expérimentales, la condition contrôle (a), la condition avec seulement le context switching (b), la condition avec seulement le distance switching (c), et la condition avec le context et distance switching simultanément (d).	69
Figure 33 - Participant dans la condition virtuel-réel adjacente. Afin de représenter ce que les participants voient dans l'HoloLens, une simulation de l'interface RA a été ajoutée à l'image.	70
Figure 34 - Taux de bonne réponse (%) moyen à la tâche de comparaison de matrices, selon le context et le distance switching. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.	72
Figure 35 - Temps de réaction (s) moyen à la tâche de détection de cibles, pour les joueurs et non joueurs de jeux vidéo, selon le context et le distance switching. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.	73
Figure 36 - Illustration de la configuration des stimuli selon le type d'attention et le contexte de présentation. Pour la séquence complète d'un essai, voir la Figure 38.	80
Figure 37 - Illustration de la configuration des stimuli selon les quatre types d'essai (dans la condition space-based).....	81
Figure 38- Illustration de la séquence complète d'un essai type.	82
Figure 39 - Effet d'indigage (temps de réaction aux essais valides - temps de réaction aux essais invalides profondeur) en fonction du contexte d'affichage et de la trajectoire d'essai invalide profondeur. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. *** Significatif à 0.001.	86
Figure 40 - Photographie des deux caméras de l'eye tracker Pupi Labs intégrées au Microsoft HoloLens 2.	118
Figure 41 - Photographies postes d'assemblage 101.1 et 101.2.	119
Figure 42 - Photographies des instructions d'assemblage pour le poste 101.1 (en haut) et 101.2 (en bas), dans la condition ordinateur (à gauche) et la condition RA (à droite).	120
Figure 43 - Taux de clignement oculaire moyen, selon le support d'instruction et la complexité du poste. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.	123

Figure 44 - Temps de réaction moyen à la tâche secondaire, selon le support d'instruction et la complexité du poste. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. *** Significatif à 0.001. 124

Figure 45 - Illustration schématique de la proportion de la charge cognitive intrinsèque et extrinsèque selon la complexité du poste et le type d'affichage..... 128

LISTE DES TABLES

Table 1 - Moyennes et écarts-types des tests optométriques, selon le type d'instructions, avant et après la tâche d'assemblage.	40
Table 2 - Moyennes et écarts-types pour chaque symptôme du Virtual Reality Symptoms Questionnaire, selon le type d'instructions (i.e., RA et contrôle), avant et après la tâche d'assemblage.	42
Table 3 - Résumé des troubles oculaires des 10 patients inclus dans l'étude.....	48
Table 4 - Moyennes et écarts-types des tests optométriques, avant et après la tâche d'assemblage.	49
Table 5 - Moyennes et écart-type pour chaque symptôme du Virtual Reality Symptoms Questionnaire, avant et après la tâche d'assemblage.	50
Table 6 - Moyennes et écarts-types des temps de réaction, selon le type d'essai, d'attention et de contexte d'affichage.	83
Table 7 - Moyennes et écarts-types de l'effet d'indigence (temps de réaction aux essais valides - temps de réaction aux essais invalides profondeur), selon le type d'attention et le contexte d'affichage.	84
Table 8 - Récapitulatif des études sur l'efficacité de la réalité augmentée pour les tâches d'assemblages.....	94
Table 9 - Choix méthodologiques des populations d'étude et du type d'assemblage en fonction des études.	103
Table 10 - Méthodologie utilisée dans les études sur l'apprentissage d'assemblage.....	105

LISTE DES ACRONYMES

AC/A Vergence accommodative

ANOVA Analyse de la variance

ART Adjusted rank transformed

CA/C Accommodation de vergence

CLT Cognitive load theory

FOV Field-of-view

GAMT General assembly task model

HMD Head-mounted display

IOR Inhibition of return

ISI Intervalle interstimuli

MDT Mémoire de travail

NASA-TLX National aeronautics and space administration task load index

RA Réalité augmentée

RM Réalité mixte

RTLX Raw task load index

RV Réalité virtuelle

VA Virtualité augmentée

VRSQ Virtual reality symptoms questionnaire

ZVBSN Zone de vision binoculaire simple et nette

INTRODUCTION

Contexte industriel : le projet IRON-MEN

Ce travail de thèse a été réalisé dans un contexte industriel, dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE), avec l'entreprise elm.leblanc SAS. Cette entreprise conçoit et fabrique en France des solutions de chauffage et de production d'eau chaude utilisant le gaz et les énergies renouvelables.

Le projet IRON-MEN, porté par elm.leblanc et soutenu par la DGE dans le cadre des Grands Défis du Numérique, vise à mettre l'opérateur augmenté au cœur de l'usine de demain via la conception d'un nouveau modèle d'usine de production capable de fabriquer chaque produit de façon unitaire, tout en conservant la même exigence de qualité et d'efficacité qu'actuellement. Disposer d'un outil métier de réalité augmentée (RA) pour accompagner les opérateurs de production en serait la première étape.

La technologie de RA peut aider l'entreprise industrielle à accélérer la production, développer sa flexibilité, augmenter la qualité, renforcer la communication et la collaboration, fournir des données précises et des rapports pour l'amélioration continue. Pour toutes ces raisons l'intégration de la RA dans les processus de fabrication pourrait agir comme un levier de compétitivité. Le but du projet IRON-MEN est donc de développer un outil de RA avec une forte capacité d'adaptation et d'interaction avec l'opérateur, lui permettant d'être formé aux tâches d'assemblage sans nuire à sa sécurité.

Objectifs de la thèse

La RA a pour but d'augmenter un environnement réel, par l'ajout d'éléments virtuels générés informatiquement. Depuis le premier système de RA développé en 1960, les différents dispositifs proposés ont connu un fort progrès technologique : e.g., réduction du poids, augmentation du champ visuel, amélioration des capacités de calcul. Ces importants progrès ont permis sa démocratisation auprès du grand public et l'augmentation de son utilisation au niveau professionnel et industriel. Cette diffusion plus large de la RA a conduit la communauté scientifique à considérer davantage le facteur humain et non uniquement les solutions technologiques et informatiques. Une évaluation des risques sanitaires potentiellement liés à une utilisation de la RA de façon régulière et prolongée est indispensable pour assurer la sécurité et la santé des futurs utilisateurs. Le présent travail de thèse comporte des objectifs scientifiques, mais également industriels. D'un point de vue scientifique, la thèse a pour but d'améliorer les connaissances sur les impacts physiologiques et cognitifs liés à l'utilisation de la RA. D'un point de vue industriel et au sein du projet IRON-MEN, l'objectif est d'identifier les potentiels risques sanitaires associés à l'utilisation de la RA ainsi que les facteurs importants à prendre en compte pour optimiser l'intégration de la RA, afin de formuler pour la médecine du travail d'elm.leblanc des recommandations sur les conditions d'usage de cette technologie.

Organisation du manuscrit

Dans le Chapitre 1, nous présentons des éléments de définition de la RA, mais aussi les différentes technologies de réalité augmentée existantes ainsi que leurs classifications.

Dans le Chapitre 2, l'objectif est de s'assurer que l'utilisation d'un dispositif de RA de type transparent ne présente pas de risque pour la santé visuelle des utilisateurs. Les effets physiologiques de la RA sur le système visuel sont évalués avec deux études associant des mesures optométriques de la fatigue visuelle, ainsi que des mesures subjectives de l'inconfort visuel. Dans le but d'une utilisation industrielle inclusive, ces deux études ont été réalisées auprès de la population générale, mais également auprès d'une population à risque.

Après avoir étudié les effets physiologiques, les effets cognitifs de la RA sont étudiés dans les Chapitres 3 et 4. Dans ces deux chapitres, l'objectif est d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation de la RA entraîne un coût cognitif supplémentaire qui pourrait dégrader les performances des utilisateurs.

Dans le Chapitre 3, deux études sont réalisées afin d'examiner les effets de la RA sur l'attention visuelle ainsi que la différence de traitement cognitif entre les informations virtuelles et réelles.

Dans le Chapitre 4, nous nous intéressons à l'intégration concrète de la RA dans le milieu industriel pour les tâches d'assemblage. Nous proposons une importante étude de terrain, directement réalisée sur les lignes de production d'elm.leblanc. Cette étude a pour but l'évaluation de la charge mentale par une combinaison de mesure objective (oculométrie), subjective (questionnaire) et comportementale (temps de réaction). Elle a également pour objectif d'évaluer l'efficacité de la RA en tant que support de formation aux tâches d'assemblage.

Enfin, nous proposerons une synthèse des résultats et apports de chacune des cinq études réalisées afin de répondre à la question des risques sanitaires associés à l'utilisation de la RA mais aussi de proposer des recommandations sur son usage en milieu industriel et des perspectives pour les recherches futures.

LA RÉALITÉ AUGMENTÉE

Ce chapitre a pour but de présenter les technologies de RA. Dans un premier temps, nous présenterons différents éléments de définition de la RA, puis nous exposerons les différentes classifications des affichages visuels de RA existants. Nous détaillerons plus particulièrement les caractéristiques du dispositif de RA utilisé dans ce projet de thèse en milieu industriel, i.e., les lunettes de RA. Enfin, nous décrirons les différentes applications de la RA notamment industrielles.

1.1 Définitions de la réalité augmentée

Dans la littérature, plusieurs définitions de la RA ont été proposées, parmi lesquelles celles de Milgram et Kishino (1994) et d'Azuma et al., (2001) sont les plus communément admises et citées.

Selon Milgram et Kishino (1994), la RA désigne tous les cas dans lesquels l'affichage d'un environnement réel est augmenté au moyen d'objets virtuels. La RA permet donc à l'utilisateur de voir le monde réel, dans lequel des objets virtuels sont superposés. Afin de mieux comprendre la façon dont les aspects « virtuels » et « réels » des environnements peuvent se combiner, Milgram & Kishino (1994) ont proposé un continuum Réalité-Virtualité (voir Figure 1).

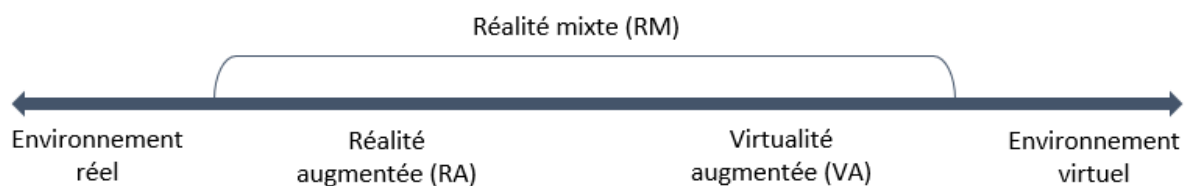


Figure 1 - Continuum Réalité-Virtualité, dans Milgram & Kishino (1994).

Aux deux extrêmes de ce continuum se trouve le monde réel dans lequel nous vivons et les environnements entièrement virtuels, i.e., la réalité virtuelle (RV). Entre les deux, la réalité mixte (RM) regroupe deux autres catégories qui diffèrent selon la combinaison du réel et du virtuel. Dans la RM on trouve donc, la réalité augmentée, dans laquelle un élément virtuel est ajouté à l'environnement réel et la virtualité augmentée (VA), dans laquelle un élément réel est ajouté dans un environnement virtuel.

Selon Azuma, la RA est définie comme tout système vérifiant les trois propriétés suivantes (Azuma, 1997; Azuma et al., 2001):

- 1) La combinaison des objets réels et virtuels dans un environnement réel.
- 2) L'alignement des objets réels et virtuels entre eux.
- 3) La possibilité d'interaction en trois dimensions et en temps réel.

Azuma et al., (2001), mentionnent également trois aspects permettant de compléter la définition proposée. Ainsi, la RA comprend également la suppression d'objets réels de l'environnement perçu (Réalité diminuée), ainsi que l'ajout d'objets virtuels combiné à la suppression d'objets réels (Réalité médiatisée), voir Figure 2. De plus, la définition n'est pas limitée à des technologies d'affichage telles que les écrans montés sur la tête, *head mounted display* (HMD). Enfin, la définition n'est pas non plus limitée au sens de la vue, car la RA peut potentiellement s'appliquer à tous les sens, y compris l'ouïe, le toucher et l'odorat.



Figure 2 - Illustration de la différence entre réalité diminuée et médiatisée www.net-workworld.com (dernière consultation le 28/05/2021).

La définition de la RA étant très large, de très nombreux dispositifs peuvent y répondre. Cependant, dans le cadre de ce travail de thèse, c'est la modalité visuelle de la RA qui est l'objet d'étude, car elle constitue le mode d'interaction le plus développé et utilisé. Dans les paragraphes suivants nous présenterons donc de façon détaillée les différents dispositifs de RA exploitant la modalité visuelle uniquement.

1.2 Les dispositifs de réalité augmentée

1.2.1 Les différents systèmes de restitution de réalité augmentée

Il existe de multiples façons d'intégrer des éléments virtuels dans le champ visuel d'un utilisateur et donc une grande variété de dispositifs de RA. Ces dispositifs ont été décrits dans de nombreux articles (Azuma et al., 2001; Bimber & Raskar, 2006; Van Krevelen

& Poelman, 2010), livres (Bimber & Raskar, 2005; Schmalsteig & Hollerer, 2016) et thèses (e.g., Cortes, 2018). Dans ces publications, bien que des différences puissent être identifiées dans la manière de présenter les systèmes de RA, deux classifications basées sur deux critères différents ressortent. La première, distingue les dispositifs de RA selon la position de l’affichage entre l’utilisateur et l’environnement réel, tandis que la seconde, les sépare selon la technologie d’affichage utilisée pour présenter le contenu visuel. Dans les paragraphes suivants nous allons présenter différents systèmes de RA, en soulignant leurs principaux avantages et inconvénients.

1.2.1.1 Classification selon la position d’affichage

Les différents systèmes de RA peuvent avoir trois supports physiques différents : être portés sur la tête (*head-mounted*), tenus à la main (*hand-held*) ou spatialement localisés dans l’environnement (*spatial*).

Systemes portés sur la tête

Il existe des systèmes portés sur la tête (voir Figure 3), dans lesquels des écrans semi-transparents sont disposés devant les yeux de l’utilisateur. Selon la complexité du dispositif, ils sont appelés casques (HDM) ou lunettes (*smart glasses*). Les différentes caractéristiques des lunettes de RA seront présentées dans le paragraphe 1.2.2. Les systèmes portés sur la tête sont intrusifs, car en plus d’être posés directement sur la tête de l’utilisateur, ils obstruent le champ visuel, ce qui demande une conception complexe afin de rendre l’appareil discret et confortable pour l’utilisateur.

Figure 3 - Exemple de dispositifs de réalité augmentée portés sur la tête, le Microsoft HoloLens 2 (gauche) et le Magic leap one (droite), <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens> (dernière consultation le 16/11/2020). *Photo retirée afin de respecter les droits d’auteur.*

Systèmes tenus en main

Ces systèmes reposent sur l'utilisation d'une caméra intégrée directement dans un écran qui peut être tenu en main. L'ajout d'éléments virtuels peut être réalisé sur des écrans de tablette ou de smartphone (voir Figure 4). Leur faible coût de production et leur facilité d'utilisation, en fait la forme de RA la plus largement diffusée auprès du grand public. Ces dispositifs présentent également l'avantage de combiner les processeurs, la mémoire, l'affichage en un seul appareil et permettent donc une manipulation mobile sans fil. Cependant, en pratique, les processeurs des téléphones portables présentent l'inconvénient d'avoir un temps de traitement lent, ce qui entraîne un retard du système et peut engendrer un rendu d'images de mauvaise qualité. Un autre inconvénient concerne la taille limitée de l'écran de la plupart des appareils portables qui restreint le champ de vision. Enfin, par rapport aux appareils fixés à la tête, les appareils portés à la main n'offrent pas un environnement de travail entièrement en mains libres pour les utilisateurs.

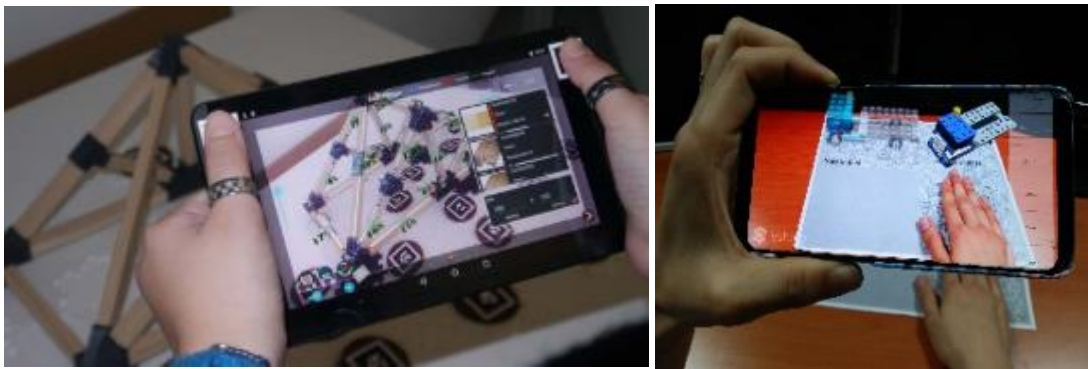


Figure 4 - Exemple de dispositifs tenus à la main utilisés à des fins de recherche, une tablette (gauche) (Lucignano & Dillenbourg, 2017) © [2017] IEEE et un smartphone (droite) (Min et al., 2020).

Systèmes spatialement localisés

Dans cette modalité, appelée *Spatial Augmented Reality*, les dispositifs de RA fixes ou mobiles sont distants de l'utilisateur et permettent d'afficher une image directement sur les objets de l'environnement réel en fournissant une superposition naturelle (voir Figure 5). L'environnement physique réel est donc enrichi d'éléments qui sont intégrés directement dans l'environnement de l'utilisateur et non pas simplement dans son champ visuel (Raskar et al., 1998). Ce type de système est développé de façon assez importante dans le cadre d'applications industrielles, car il présente l'avantage pour les utilisateurs de ne pas avoir besoin de s'équiper d'un quelconque dispositif et de garder les mains libres. Cependant, l'inconvénient de ces systèmes est qu'ils nécessitent une installation complexe des dispositifs nécessaires (e.g., écrans, projecteurs) parfois directement au sein de la zone d'utilisation. Les systèmes spatialement localisés ne sont donc pas toujours optimisés pour les utilisations nécessitant la mobilité de l'utilisateur.

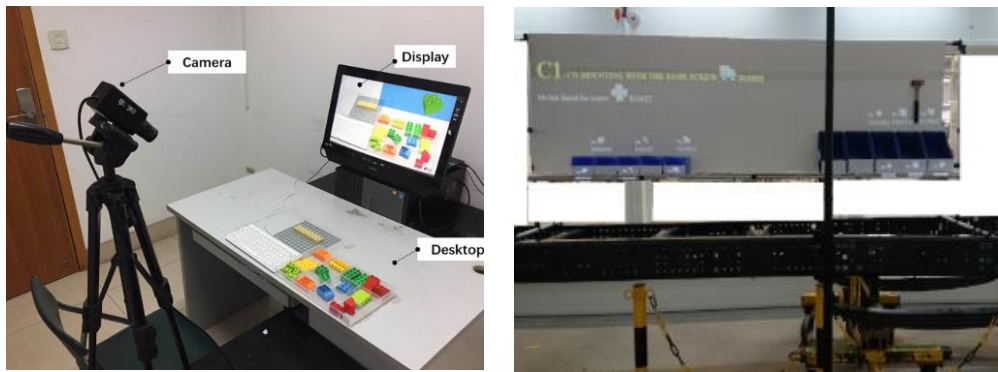


Figure 5 - Exemple de dispositifs localisés spatialement dans l'environnement, utilisés en laboratoire (gauche) (Yang et al., 2019) et sur des lignes d'assemblages (droite) (Bode, 2019).

Notons que dans cette catégorie nous trouvons également les affichages tête haute (*Head-up-display*, HUD (Weintraub & Ensing, 1992)). L'HUD est un instrument de pilotage qui permet de superposer à la vision extérieure, des informations sous forme d'une symbologie (voir Figure 6), i.e., des symboles numériques (caractères numériques) et analogiques (formes géométriques) (Roumes et al., 2001). Ce type de dispositif est largement utilisé dans un contexte militaire (voir Shrager (1978) pour une revue), car il permet aux pilotes de visualiser simultanément une scène réelle et de nombreuses informations en temps réel lors de situations critiques (e.g., atterrissage, faible visibilité).

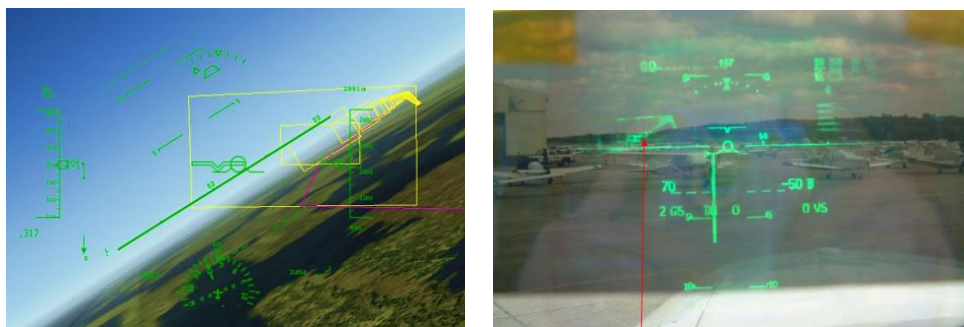


Figure 6 - Exemple de symbologie utilisée dans les HUD (Ertem, 2005) © [2005] IEEE.

1.2.1.2 Classification selon le type de technologie

Pour chacune des trois catégories présentées précédemment, il existe trois technologies différentes permettant de présenter le contenu en RA, les systèmes dits : transparents (*Optical see-through*), opaques (*Video see-through*) et projectifs (*Projective*). Une comparaison complète des systèmes transparents et opaques est proposée par Rolland & Fuchs (2000). Dans le présent travail de thèse, le système de RA utilisé correspond à des lunettes de RA, donc un système de type monté sur la tête. C'est pourquoi dans les prochains paragraphes, nous développerons uniquement les trois types de technologies

(i.e., transparente, opaque et projective) pour les dispositifs montés sur la tête. Cependant, il est important de préciser qu'il existe également, pour les dispositifs portés à la main et localisés spatialement, différents systèmes opaques, transparents et projectifs (voir Bimber & Raskar (2005) et Van Krevelen & Poelman (2010) pour une revue des différents systèmes existants).

Systèmes transparents

Les systèmes transparents (voir Figure 7) permettent à l'utilisateur une vision directe du monde réel, celle-ci est augmentée par la projection de contenu généré par un ordinateur, sur des écrans semi-transparent devant les yeux de l'utilisateur (e.g., Microsoft HoloLens, Epson Moverio, Optinvent Ora-2, Meta 2). Le principal avantage de ce système est qu'il offre une vue directe sur l'environnement réel avec la résolution du système visuel humain, ainsi, seuls les éléments virtuels sont vus avec une plus faible résolution. Il présente aussi l'avantage d'être moins cher, plus sûr et n'engendre pas de décalage de point de vue dû au positionnement de la caméra. Néanmoins, il fournit généralement un champ de vision restreint pour l'affichage de contenu virtuel, entre 20° et 40° pour la plupart. De plus, la combinaison des objets virtuels au moyen d'optiques transparentes, présente l'inconvénient de réduire la luminosité et le contraste des images, ce qui rend cette technologie, par exemple, peu adaptée à une utilisation en extérieur.

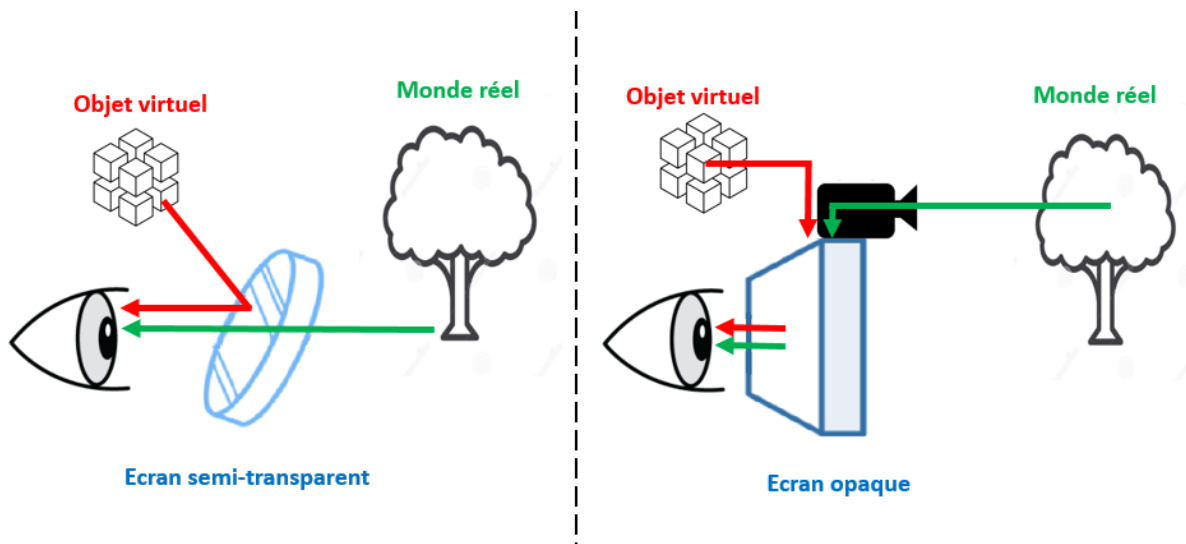


Figure 7 - Illustration schématique des systèmes transparents (gauche) et opaques (droite).

Systèmes opaques

Dans les systèmes opaques (voir Figure 7) la vision du monde est acquise par une ou deux caméras externes et est présentée dans le casque après avoir été fusionnée de manière cohérente avec le contenu virtuel (e.g., Trivisio SGXA61, Totem VRVana). Ainsi, dans ces systèmes la vue augmentée est présentée en partageant le point de vue de la

caméra, ce qui peut entraîner une altération de la coordination œil-main. En effet, il y a un décalage entre la position réelle, celle de l'œil de l'utilisateur et la position « virtuelle » qui est celle de la position spatiale des caméras (Biocca & Rolland, 1998). Bien que la luminosité et le contraste des objets virtuels puissent être facilement combinés avec l'environnement réel, les éléments virtuels et réels sont tout de même proposés avec une résolution inférieure à celle de l'œil de l'utilisateur. Enfin, comparés aux systèmes transparents et projectifs, les systèmes opaques présentent des risques plus importants de générer des symptômes de *motion sickness* (similaires à ceux de cinétose), car les utilisateurs ne perçoivent plus leur propre corps et les indices présents dans l'environnement.

Systèmes projectifs

Les systèmes projectifs (*Projection-based HMD* ou *Head-mounted projection display*) sont constitués d'un mini projecteur monté sur la tête, ou de matériel placé dans l'environnement (Figure 8). Cette technologie se situe à la limite des HMD et des écrans de projection conventionnels tels que la technologie CAVE (Cruz-Neira et al., 1992). De nombreux systèmes ont été proposés par diverses équipes de recherches, sans qu'un en particulier ne fasse, jusqu'à présent, l'objet d'un développement commercial (Aksit et al., 2014; Bolas & Krum, 2010; Curatu et al., 2005; Martins et al., 2004). Ce genre de dispositif propose un large champ de vision et peut être utilisé avec diverses surfaces de projections. Néanmoins, les projecteurs offrent une résolution et une luminosité limitée, qui dépend des conditions environnementales d'illumination. Par ailleurs, la mise en place de tels systèmes nécessite de grands espaces, des surfaces d'affichage spéciales et des projecteurs de grande qualité.



Figure 8 - Exemple de systèmes de RA projectifs portés sur la tête (Hua & Gao, 2007; Kade et al., 2015).

Bien que les systèmes transparents, opaques et projectifs présentent des différences du point de vue technologique, ces systèmes de RA montés sur la tête présentent un défi commun, à savoir trouver un équilibre entre choisir des optiques lourdes (permettant la meilleure qualité d'image) et garantir le confort et l'expérience de l'utilisateur (en évitant les appareils encombrants).

1.2.2 Les lunettes de réalité augmentée

Parmi les systèmes de RA montés sur la tête, nous trouvons les lunettes de RA (i.e., systèmes transparents montés sur la tête). Il existe actuellement sur le marché des dizaines de lunettes de RA qui se distinguent entre elles par un certain nombre de caractéristiques. Dans les prochains paragraphes, nous allons donc présenter certaines caractéristiques optiques, qui peuvent avoir un impact physiologique sur le système oculomoteur et visuel des utilisateurs, mais également les caractéristiques informatiques qui peuvent impacter la manière dont l'utilisateur va pouvoir ou non interagir avec les objets virtuels et donc sur la qualité de l'expérience.

Le système optique

Il existe deux grandes techniques utilisées pour les affichages transparents : les miroirs courbes et les guides d'ondes. Concernant la première technique, elle repose sur des miroirs courbes semi-réfléchissants, placés devant l'œil avec un système de projection optique (Bimber & Raskar, 2005). Cette technique entraîne une visualisation inconfortable de l'image pour les utilisateurs et présente une forte distorsion, réduisant la résolution de l'image. S'agissant de la technique basée sur les guides d'ondes (voir Kress (2019) pour une description détaillée), elle permet de réduire les composants optiques et électroniques d'affichage devant le visage de l'utilisateur, qui peuvent ainsi être déplacés sur le côté (au niveau des tempes). Elle est plus adaptée pour la RA, car elle permet d'obtenir une vue totalement dégagée du monde. Parmi les diverses techniques de guide d'ondes, on retrouve : l'optique diffractive (e.g., Microsoft HoloLens), l'optique holographique (e.g., prototype Sony), l'optique polarisée (e.g., prototype Lumus) et l'optique réfléchissante (e.g., Google glass), pour une description détaillée voir Mirza & Sarayeddine (2012).

Monoculaire versus binoculaire

Il est possible de distinguer des systèmes de RA dit monoculaires et binoculaires. Les systèmes monoculaires (e.g., Google glass, Vuzix M-100 Smart Glasses) proposent un système optique transparent dédié à un seul des deux yeux. Ils sont donc plus simples à configurer et plus légers. Cependant, le contenu virtuel n'étant disponible que pour un œil, le champ de vision est plus petit et l'immersion peut être moins importante. Par ailleurs, lorsque que les deux yeux ne sont pas stimulés de la même façon, une compétition se crée entre les deux, c'est le phénomène de rivalité binoculaire. Ceci peut avoir deux conséquences, soit l'image vue par un œil peut être complètement supprimée (i.e., non traitée par le système visuel), soit les images de l'œil droit et de l'œil gauche sont vues alternativement (voir Bayle et al., (2019) pour une revue récente de la rivalité binoculaire).

Les systèmes binoculaires quant à eux, présentent une image distincte à chaque œil, avec des points de vue légèrement décalés imitant le système visuel humain pour créer

une vision stéréoscopique. Ces systèmes proposent de nombreux indices de profondeur pour la vision stéréoscopique et une immersion plus grande. Cependant, ils sont plus lourds, plus chers et demandent une plus grande capacité de calcul.

Le champ de vision

Dans le cadre des dispositifs stéréoscopiques, le champ de vision (*field-of-view*; FOV) est défini comme la taille angulaire totale de l'image virtuelle visible par les deux yeux et qui est exprimée en degré. Ce FOV est relativement faible pour la plupart des lunettes de RA proposées actuellement. En effet, le champ visuel binoculaire humain est de 180° en horizontal et 175° en vertical. Cependant, à ce jour, les meilleurs systèmes optiques transparents offrent un FOV entre 40° et 60° en horizontal et entre 20° et 30° en vertical.

Le choix du FOV le plus approprié est un défi complexe. En effet, les affichages avec un FOV large, permettent une présence et une interaction plus importante. Par ailleurs, de nombreuses études en RV ont montré qu'un FOV restreint peut dégrader les performances de locomotion, de jugement de distance et de manipulation (voir Arthur (2000) pour une revue). Ainsi, bien que les FOV larges présentent des avantages, leur production commerciale se heurte à des difficultés techniques, dues aux propriétés physiques des optiques et à l'augmentation du poids du dispositif associé, ne permettant pas une forte augmentation des FOV proposés.

Les capteurs

Les lunettes de RA ont pour but d'offrir à l'utilisateur une interaction la plus naturelle possible avec les éléments virtuels, ce qui implique de pouvoir localiser très précisément l'environnement réel ainsi que les mouvements de l'utilisateur. Pour réaliser cette localisation, le système doit posséder un certain nombre de capteurs. Toutes les lunettes de RA ne sont pas équipées des mêmes capteurs. Parmi ceux que l'on peut retrouver, on note les GPS, les accéléromètres, les gyroscopes ainsi que les magnétomètres, mais également les caméras couleur ou encore les capteurs de profondeur. Plus la lunette est équipée de capteurs, plus l'interaction et l'immersion de l'utilisateur avec les éléments virtuels sont de qualité.

La capacité de calcul intégrée et la mobilité

Tous les dispositifs de RA ne sont pas équipés de capacité de calcul intégrée. Certains n'offrent qu'une fonctionnalité d'affichage et doivent être connectés à un terminal externe pour effectuer les différents traitements nécessaires. Cette connexion peut être réalisée avec un ou plusieurs câbles, ce qui peut empêcher l'utilisateur de se déplacer librement dans son environnement. D'autres dispositifs intègrent les éléments de calcul de façon déportée, à l'aide d'un boîtier attaché à la ceinture, ce qui peut également réduire la mobilité de l'utilisateur (Figure 9). Enfin, pour certains dispositifs, tous les éléments nécessaires aux différents calculs sont intégrés directement dans les lunettes, offrant un dispositif autonome et utilisable avec une grande mobilité.



Figure 9 - Dispositif *pick-by-vision*, utilisant le Microvision Nomad ND2000 (Schwerdtfeger et al., 2009) © [2009] IEEE.

1.2.3 Le Microsoft HoloLens

Dans le cadre du projet IRON-MEN, elm.leblanc a choisi comme système de RA, les lunettes Microsoft HoloLens. L'HoloLens 1 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) a été mis sur le marché en 2015 (Figure 10). Du point de vue du système optique, l'HoloLens est un système binoculaire équipé d'un guide d'ondes (voir Kress & Cummings (2017) pour une description détaillée de l'architecture optique). Il propose un FOV diagonal atteignant environ 35° (30°x17,5°). Il offre une très bonne résolution pour chaque œil (1280 x 720), ainsi qu'une calibration automatique de la distance pupillaire. Comme la plupart des lunettes de RA, la distance focale est fixée à 2m. L'HoloLens est équipé de

Figure 10 - Le Microsoft HoloLens version 1 (gauche), architecture technique de l'affichage et des capteurs (droite). Photographies de Microsoft, disponibles sur <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/>. Photo retirée afin de respecter les droits d'auteur.

nombreux capteurs : 4 caméras périphériques utilisées pour la localisation de l'environnement, un capteur de profondeur, une caméra frontale, 4 microphones, une unité de mesure de l'inertie (avec accéléromètre, gyroscope, magnétomètre) et un capteur de lumière ambiante. Le casque fait 579g, il a une taille unique, mais possède un arceau réglable et est compatible avec le port de lunettes. Aucun câble n'est nécessaire durant son utilisation, offrant une grande mobilité à l'utilisateur. De par ses capteurs, ses performances de calcul, son autonomie et son ergonomie, ce casque est un des systèmes de RA les plus aboutis à ce jour.

En 2019, Microsoft propose une version 2 de l'HoloLens (Figure 11). L'HoloLens 2 pèse 566g, propose un FOV de 43°x29°, en plus de la calibration automatique de la distance pupillaire, il possède un eye tracker intégré de 30Hz. Les différences principales par rapport à la HoloLens 1, concernent l'ajout d'un oculomètre intégré et donc deux caméras infrarouges en plus. Cet oculomètre permet un accès en temps réel aux données et offre la possibilité d'utiliser le regard pour positionner, sélectionner et naviguer dans l'interface du casque. Son ergonomie a été améliorée par une répartition du poids de façon homogène sur l'ensemble de la tête ainsi que par la présence d'une visière amovible.

Figure 11 - Le Microsoft HoloLens version 2. <https://www.microsoft.com/fr-fr/holo-lens/>. *Photo retirée afin de respecter les droits d'auteur.*

1.3 Les secteurs d'application de la réalité augmentée

Les nombreuses avancées matérielles et informatiques de la RA, ont permis de proposer des solutions de RA s'intégrant à la fois auprès du grand public, mais également dans le milieu de l'industrie et de la Défense (Kress & Starner, 2013). La RA est ainsi utilisée dans le domaine des jeux (Avery et al., 2006; Rauschnabel et al., 2017), de l'art et de la culture (Jung & Han, 2016; Jung et al., 2016) et de l'aide à la mobilité (Kim et al., 2006). Elle est également une solution dans les domaines professionnels tels que la médecine (Sutherland et al., 2019; Wong et al., 2018), la Défense (Laviola et al., 2015; Roberts et al., 2012) et l'aviation (Afonso et al., 2017; Macchiarella et al., 2005).

Les environnements virtuels développés en RA permettant d'enrichir les perceptions des utilisateurs, d'optimiser les possibilités d'actions et de planification de tâches (Burkhardt, 2003), la RA intervient également dans de très nombreux secteurs industriels. La plupart des études qui s'intéressent à la RA en milieu industriel proposent leur propre classification des différents secteurs d'application de la RA (Elia et al., 2016; Nee et al., 2012; Van Krevelen & Poelman, 2010). Bien qu'il n'existe pas de classification unique de ces différents secteurs industriels, nous pouvons en identifier quatre fréquemment rapportés dans les récentes revues de la littérature (Fraga-Lamas et al., 2018; Jetter et al., 2018; Quandt et al., 2018; X. Wang et al., 2016; Werrlich et al., 2017). Ainsi, les systèmes de RA sont actuellement largement intégrés, pour la maintenance (Anastassova et al., 2005; Frigo et al., 2016; Henderson & Feiner, 2011) et le design (Caricato et al., 2014; Fiorentino et al., 2002; Shen et al., 2010). La RA est également très souvent utilisée dans le cadre de la formation (Gavish et al., 2015; Leu et al., 2013; Suárez-Warden et al., 2015), ainsi que pour la réalisation de tâche d'assemblage (Hou et al., 2015, 2013; Tang et al., 2003).

De plus en plus d'entreprises mettent ainsi en place des projets industriels utilisant la RA et plus particulièrement le Microsoft HoloLens, telles que Renault Trucks, Framatome, Safran ou en encore Vinci autoroutes. Dans le cadre du projet industriel IRON-MEN, elm.leblanc a établi un partenariat associant, l'Institut Mines Télécom, la société Immersion et Adecam Industrie (les détails du projet sont disponibles en Annexe 1). La RA sera intégrée au sein de l'usine d'elm.leblanc, avec pour objectif majeur de mieux former les opérateurs dans les lignes d'assemblage et de production. L'application de RA développée aura pour but l'accompagnement d'un nouvel opérateur lors de sa formation à l'assemblage d'un produit, ou encore la formation d'un opérateur expérimenté à l'assemblage d'un nouveau produit.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé des éléments de définition et de classification des différents dispositifs de RA proposés actuellement. Nous avons également présenté diverses caractéristiques techniques ou ergonomiques qui distinguent les différentes lunettes de RA, possédant chacune certains avantages et limites. Les importantes avancées technologiques ont permis à la RA de s'intégrer dans de très nombreux domaines d'applications, notamment dans le milieu industriel. Certaines caractéristiques des dispositifs de RA semblent présenter un intérêt dans le cadre d'utilisations professionnelles et industrielles. Ainsi, comparés aux dispositifs tenus à la main et à ceux spatialement localisés, les dispositifs portés sur la tête permettent le maintien d'activité manuelle et ne nécessitent pas d'installation de plusieurs appareils au sein de la zone de travail. De la même manière, en comparaison des systèmes opaques et projectifs, les systèmes transparents assurent une visualisation directe du monde réel avec la résolution du système visuel humain et ne nécessitent pas de surface de projection particulière. Les dispositifs transparents montés sur la tête semblent être adaptés à des utilisations industrielles, toutefois

ces derniers présentent des limitations d'ordre technologique et ergonomique qui ne peuvent pas être négligées. Ainsi, l'utilisation industrielle de la RA dans le domaine de l'assemblage étant en augmentation, il est nécessaire d'en évaluer les conséquences sur les utilisateurs. Dans les chapitres suivants, nous étudierons donc dans quelle mesure l'utilisation de dispositifs de RA peut avoir des effets physiologiques sur la vision binoculaire (Chapitre 2), mais également cognitifs sur l'attention (Chapitre 3) et la charge mentale (Chapitre 4). Nous présenterons dans chacun de ces chapitres, une revue de la littérature, l'élaboration des manipulations expérimentales nous permettant d'adresser ces problématiques, ainsi que les résultats obtenus.

IMPACT DE LA RÉALITÉ AUGMENTÉE SUR LA VISION BINOCULAIRE

2.1 Le système oculomoteur

Le principe de la RA est de permettre à l'utilisateur de voir le monde réel, dans lequel des objets virtuels sont superposés. Bien que d'autres modalités puissent être utilisées (auditive, haptique), c'est la vision qui est principalement stimulée en RA. Dans l'objectif d'examiner dans quelle mesure le système visuel peut être impacté par la RA, nous allons dans un premier temps présenter le système oculomoteur et ses mécanismes.

2.1.1 L'œil

L'œil est une structure optique complexe (voir Figure 12) qui transmet la lumière visible jusqu'à la rétine. La lumière va traverser plusieurs couches, d'avant en arrière, la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin, le corps vitré et la rétine. La quantité de lumière traversant est limitée par l'ouverture de la pupille, modulée par la constriction ou l'expansion de l'iris. La cornée est l'élément réfractif le plus important de tout le système oculaire humain. Elle possède à elle seule un pouvoir réfractif d'environ 42 dioptries. L'humeur aqueuse transmet la lumière traversée par la cornée presque sans modification. Le cristallin est une lentille convergente qui possède un pouvoir réfractif d'environ 20 dioptries. Le cristallin est maintenu en place par la zonule de Zinn, un ligament fixé sur le muscle ciliaire. La contraction du muscle ciliaire, permet le relâchement de la zonule de Zinn, entraînant une modification de la courbure du cristallin, ce qui permet l'accommodation. Le corps vitré est un liquide gélatineux qui remplit toute la cavité entre le cristallin et la rétine, et qui possède un indice de réfraction proche de celui de l'eau. Enfin, la rétine est une fine membrane constituée de plusieurs couches, qui permet au signal lumineux d'être transformé en signal électrique, grâce à des photorécepteurs (cônes et bâtonnets). Le signal est ensuite transmis aux cellules bipolaires et ganglionnaires, puis au reste des voies visuelles pour être traité par les aires visuelles (voir Chapitre 3).

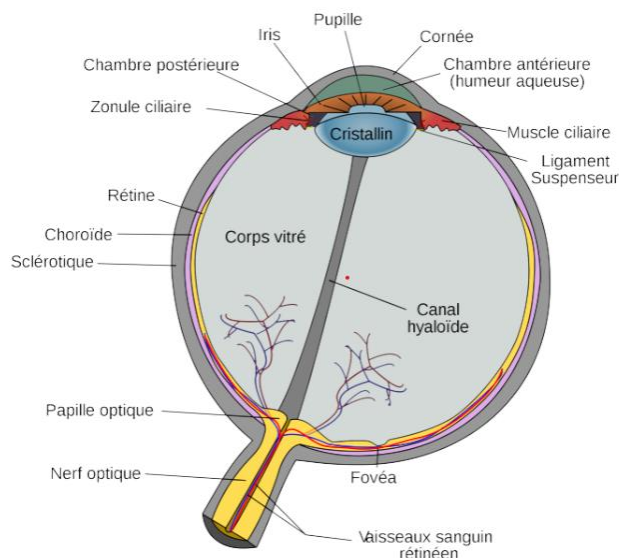


Figure 12 - Schéma de l'anatomie de l'œil humain, <https://commons.wikimedia.org/> (dernière consultation le 04/06/2021).

2.1.2 Les mécanismes du système oculomoteur

Une stimulation visuelle entraîne un triple ajustement de la part du système oculomoteur, i.e., une modification de l'accommodation, un mouvement de vergence et une variation du diamètre pupillaire. Les trois mécanismes de cette réponse motrice sont simultanés et interdépendants, définissent la triade de la vision de près. L'ajustement de la triade de la vision de près (accommodation, vergence et myosis) est fonction de la distance et la forme de la stimulation.

2.1.2.1 La composante de vergence

Le mécanisme de vergence a pour but d'aligner les axes visuels des deux yeux afin de fixer un même objet. Les mouvements de vergence sont assurés par les muscles oculomoteurs, ils ont pour but de stabiliser l'image rétinienne et de garder l'objet d'intérêt sur la fovéa. La vergence est un mouvement disjonctif des yeux dans des directions opposées et a comme fonction d'obtenir une vision simple de l'objet fixé. Elle intervient lorsqu'un individu change sa fixation d'une distance à une autre. Lorsque que l'angle des lignes du regard augmente, on parle de convergence et lorsqu'il diminue de divergence (voir Figure 13). La vergence peut s'exprimer en degré ($^{\circ}$), angle mètre (MA) ou en dioptrie prismatique (DP).

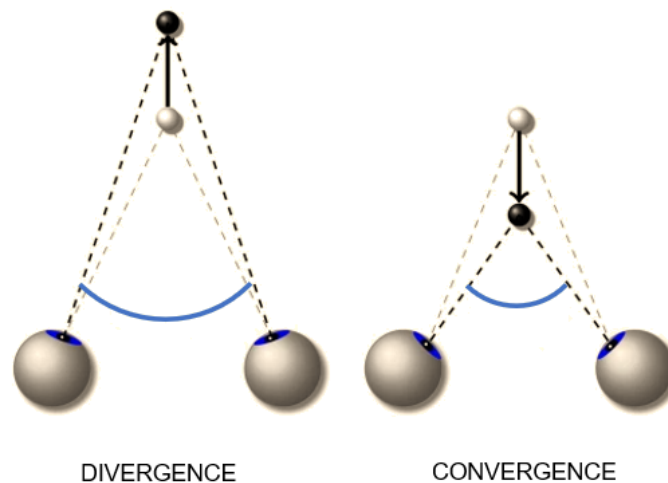


Figure 13 - Illustration de la notion de divergence (gauche) lorsque l'objet s'approche de l'observateur et de convergence (droite) lorsque l'objet s'éloigne de l'observateur.

L'angle de vergence est représenté en bleu.

La vergence horizontale répond à plusieurs stimuli : la disparité rétinienne, le changement d'accommodation et la variation de la proximité de la cible. La réponse de vergence face à ces stimuli peut présenter une certaine erreur, que l'on appelle disparité de fixation (Schor, 1979). Il y a disparité de fixation quand les deux images rétiniennes d'un objet unique ne tombent pas sur des points correspondants de la rétine, mais se trouvent cependant dans les aires de Panum, l'objet est alors vu simple (i.e. unique).

2.1.2.2 La composante accommodative

Le mécanisme d'accommodation a pour but d'obtenir et de maintenir nette l'image d'un objet sur la rétine (Ciuffreda, 1991). L'accommodation est un mécanisme réflexe et involontaire (parfois volontaire), qui correspond à une modification de la puissance dioptrique de chaque œil.

Lorsque la fixation du regard passe d'un objet à un autre, l'image rétinienne présente un flou, ce flou rétinien va stimuler l'accommodation. Le signal sensoriel de flou entraîne une excitation des cellules corticales et transmet une commande motrice aux muscles ciliaires (Hung et al., 2002). Ceci va en modifier l'état de contraction et déformer le cristallin pour obtenir une image rétinienne nette et une vision claire. En fixant un objet proche, le cristallin sera moins bombé que lorsqu'il fixe un objet éloigné (voir Figure 14). L'accommodation s'exprime en dioptrie (D), D correspondant à l'inverse de la distance entre l'œil et l'objet. L'accommodation nécessaire pour voir net un objet à 0.5m est de 2 D ($1/0.5=2$).

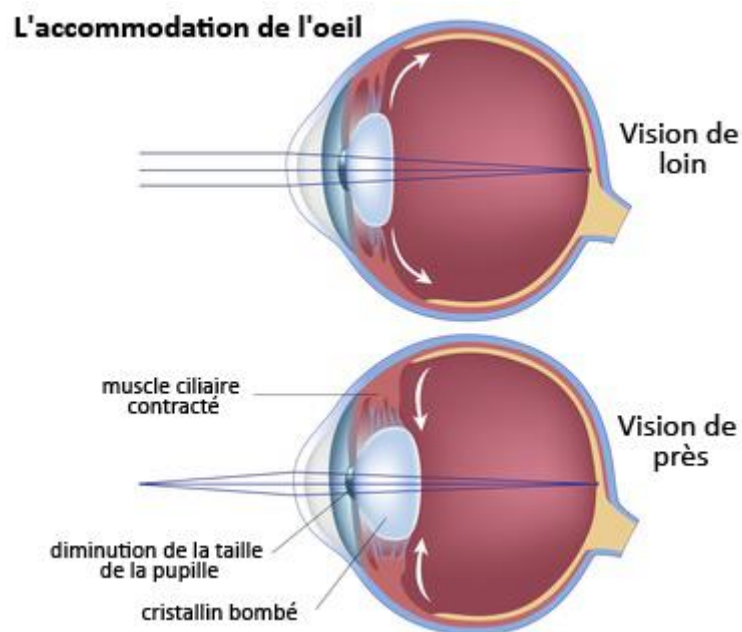


Figure 14 - Focalisation d'un rayon lumineux sur la rétine par le cristallin en vision de loin (haut) et de près (bas) <https://www.charllaas.com/> (dernière consultation le 04/06/2021).

L'accommodation est un processus monoculaire et consensuel, ainsi l'accommodation d'un œil est identique à l'accommodation de l'autre œil (Marran & Schor, 2000). Notons cependant que certaines études montrent que l'accommodation peut varier d'un œil à l'autre, on parle alors d'aniso-accommodation (Lynn Marran & Schor, 1998; Marshev, 2021). Le stimulus principal de l'accommodation est le flou rétinien (Campbell & Westheimer, 1960; Tucker & Charman, 1979), lorsque les rayons lumineux sont focalisés en arrière ou en avant de la rétine. La réponse accommodative peut également être initiée

par les aberrations chromatiques et le changement de taille (Campbell & Westheimer, 1959; Kruger & Pola, 1986). Avec l'âge, la latence de la réponse accommodative augmente et son amplitude diminue (Mordi & Ciuffreda, 2004). Vers l'âge de 40 ans, l'humain commence généralement à présenter une presbytie, c'est-à-dire une difficulté à accommoder sur un objet proche.

Pour un état stable d'accommodation donné, il existe une gamme de distance pour laquelle un objet peut être déplacé sans entraîner un flou détectable par le sujet, cette gamme est appelée profondeur de champ (Wang & Ciuffreda, 2006). La profondeur de champ permet une tolérance neurologique et perceptuelle à de faibles erreurs de focalisation. Selon les 28 études analysées par Wang et Ciuffreda (2006), les valeurs de profondeur de champ observées varient de 0.8D à 3.50D. Les différences observées sont dues à l'utilisation de différentes méthodologies d'évaluation (stimuli, critère de flou).

La profondeur de champ permet au sujet de voir net sans être parfaitement focalisé sur l'objet, elle est liée aux notions d'avance ou de retard accommodatif. La différence, en dioptrie, entre le stimulus accommodatif et la réponse accommodative du sujet à ce stimulus constitue l'avance ou le retard accommodatif (Figure 15). Lorsque le sujet est focalisé en arrière du point de fixation on parle de lag (retard accommodatif) et lorsque le sujet est focalisé en avant du point de fixation on parle de lead (avance accommodatif).

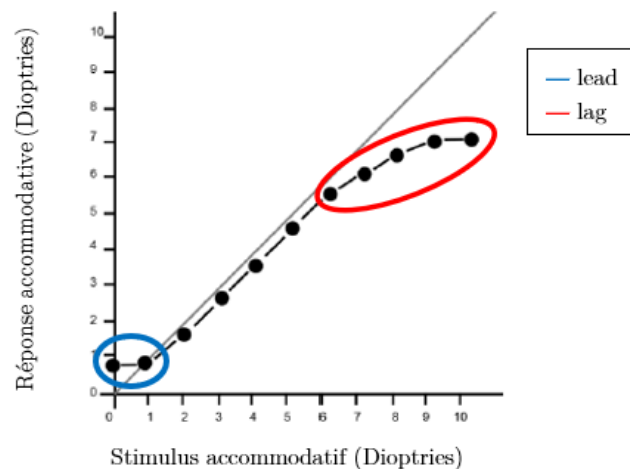


Figure 15 - Réponse accommodative en fonction du stimulus accommodatif.

2.1.2.3 Le lien croisé entre vergence et accommodation

Parmi les trois mécanismes de la réponse oculomotrice, la vergence et l'accommodation peuvent être décomposées en quatre composantes (Heath, 1956; Maddox, 1893), qui se combinent pour permettre une focalisation et un alignement optimal sur l'objet observé. Ces quatre composantes sont :

- La réponse réflexe qui correspond au mécanisme permettant de répondre aux stimulations comme le flou et la disparité rétinienne.
- La réponse proximale qui est la composante initiée par la conscience du sujet de la proximité de la cible.

- La réponse tonique désignant la réponse liée à l'innervation minimale des muscles extraoculaires, c'est-à-dire lorsque le système oculomoteur n'est soumis à aucun stimulus. Elle correspond à la réponse de base permettant de passer de la position de repos anatomique à une position de repos dite physiologique.
- Le lien croisé correspondant à une interaction existante entre la composante accommodative et celle de vergence. Par ce lien, la mise en place d'une réponse accommodative conduit simultanément à une réponse de vergence et inversement. En vision naturelle, l'accommodation et la vergence sont couplées afin de maintenir l'objet net et simple (Fincham & Walton, 1957; Maddox, 1893).

Ce lien existant entre l'accommodation et la vergence conduit aux notions de vergence accommodative et d'accommodation de vergence. La vergence accommodative correspond à la réponse de vergence engendrée par la réponse accommodative (initiée par le flou de l'image rétinienne). La vergence accommodative est exprimée par le ratio AC/A , représentant la modification de l'angle de vergence pour chaque dioptrie (D) de demande accommodative (Mays, 2008). Il est estimé en moyenne à 0,63 AM/D (Morgan, 1944). L'accommodation de vergence désigne l'augmentation de la réponse accommodative lors de la réponse de vergence (entraînée par une disparité rétinienne). L'accommodation de vergence est exprimée par le ratio CA/C , qui correspond à la quantité d'accommodation en dioptries associée avec un changement de vergence donné (Mays, 2008). Ce dernier est estimé en moyenne à 0.5D/AM (Scheiman & Wick, 2014).

En conditions naturelles, la disparité rétinienne et le flou rétinien fournissent des signaux cohérents par rapport à la distance de l'objet. Ainsi la vergence et l'accommodation sont coordonnées car la distance d'accommodation et la distance de vergence sont les mêmes quel que soit l'endroit où l'observateur regarde. En conséquence, les demandes d'accommodation et de vergence varient de façon prévisible selon une relation linéaire, appelée droite de demande (Figure 16).

De part et d'autre de cette droite de demande se trouve une zone de confort qui correspond à une plage de vergence et de distance d'accommodation dans laquelle la vision binoculaire est confortable pour l'observateur (Percival, 1892). Au-delà de cette zone, se trouve la Zone de Vision Binoculaire Simple et Nette (ZVBSN), correspondant à une plage dans laquelle l'observateur peut avec effort, maintenir une image unique bien nette (Hofstetter, 1945). La visualisation de stimuli se trouvant en dehors de ces zones peut conduire à une fatigue visuelle.

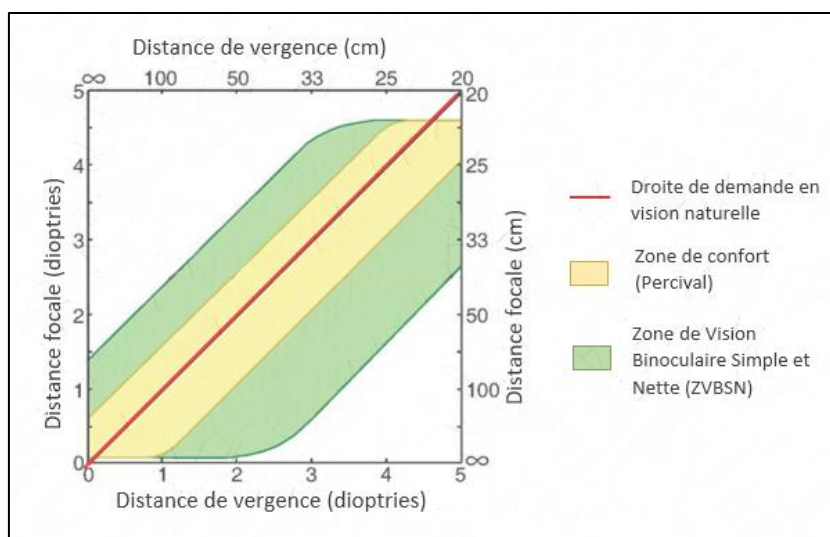


Figure 16 - Interaction entre la réponse de vergence et d'accommodation.

2.2 Problématiques oculomotrices imposées par l'utilisation de la RA

Les dispositifs de RA et les dispositifs stéréoscopiques au sens large conduisent à une vision artificielle qui diffère de la vision naturelle. L'objectif du prochain paragraphe est d'expliquer certaines spécificités que le fonctionnement particulier des dispositifs de RA impose sur le système oculomoteur et qui sont la cause de fatigue visuelle (paragraphe 2.3).

2.2.1 Le conflit accommodation-vergence

La stéréoscopie est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Les dispositifs stéréoscopiques (le cinéma 3D, la RV et RA) tentent de restituer au mieux les indices binoculaires en environnement virtuel, pour cela, une disparité binoculaire doit être créée. Cependant, ces dispositifs proposent une vision stéréoscopique artificielle qui se différencie de la vision naturelle.

En vision naturelle, les mécanismes d'accommodation et de vergence ont un traitement synchronisé et s'exercent sur un même plan, le plan de l'objet fixé, voir Figure 17a. Tandis qu'en vision par dispositif stéréoscopique, il y a désynchronisation de l'accommodation et la vergence (Shibata et al., 2011). En effet, l'accommodation est toujours réalisée sur le plan d'affichage de l'image virtuelle (généralement 2 m) et la vergence s'effectue sur l'image en relief, qui peut être en arrière (conflit négatif) ou en avant (positif), voir Figure 17b.

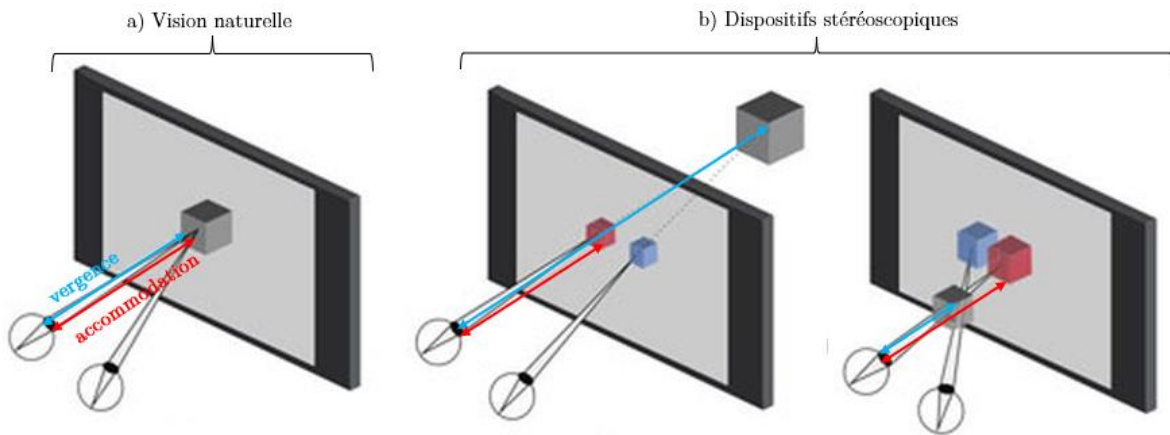


Figure 17 - Illustration du conflit accommodation-vergence dans les dispositifs stéréoscopiques : conflit négatif (au milieu), conflit positif (à droite). Adaptée de Frey et al., (2014).

Ainsi, en vision naturelle la relation entre accommodation et vergence est linéaire. Tandis que lors d'une visualisation par un dispositif stéréoscopique, l'accommodation et la vergence ne sont plus en concordance, on parle alors de conflit accommodation vergence (Lambooij et al., 2007; Wann et al., 1995). Selon Mon-Williams et al., (1993), la dissociation entre la demande accommodative et la demande de vergence est le principal facteur de stress binoculaire des dispositifs stéréoscopiques. De nombreuses études ont ainsi montré que le conflit accommodation-vergence entraîne de la fatigue visuelle ainsi que de l'inconfort visuel (Emoto et al., 2005; Hoffman et al., 2008; Lambooij et al., 2009; Mon-Williams & Wann, 1998; Wann et al., 1995).

Ainsi le conflit accommodation vergence à lui seul a déjà des conséquences sur le système oculomoteur. Cependant, les paramètres de ce conflit accommodation vergence sont également à prendre en compte. En effet, plus le conflit, donc la distance entre le plan d'accommodation et de vergence est grande (e.g., les téléstéréoscopes), plus les signes de fatigue visuelle sont élevés (Miles & Optican, 1987; Neveu et al., 2010). Ceci s'explique de par une demande oculomotrice qui s'éloigne fortement de la ZVBSN. En plus de la distance, le sens du conflit a également un impact. Les situations de conflit accommodation-vergence positif, i.e., avec des images virtuelles proches du système visuel, sont responsables d'une plus grande fatigue (Banks et al., 2013; Shibata et al., 2011; Sun et al., 2020). Enfin, des études montrent que ce serait davantage le taux de changement du conflit entre accommodation et vergence qui serait la source de fatigue et non le conflit lui-même (Kim et al., 2014). Plus le conflit est discontinu et rapide, plus la fatigue est importante (Emoto et al., 2005).

2.2.2 La rivalité focale

La physiologie de l'œil humain fait qu'il ne peut accommoder que sur une seule profondeur à la fois, i.e., soit sur un objet proche, soit sur un objet éloigné, mais il est impossible de faire la mise au point sur les deux simultanément (voir Figure 18).

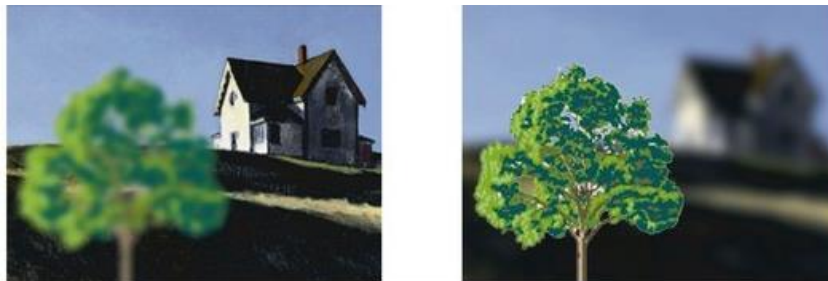


Figure 18 - Illustration de la limite du système accommodatif, qui ne peut accommoder qu'à une seule profondeur à la fois. Lorsque l'arbre est net, la maison est floue et inversement. (Schowengerdt & Seibel, 2006).

Dans les dispositifs de RA transparents actuellement proposés, la distance focale du contenu virtuel est fixe (généralement 2m). Cependant, dans l'environnement réel la distance focale des différents objets réels varie. Ainsi, une distance inégale entre les objets du monde réel et les objets virtuels est inévitable, ce qui entraîne une « rivalité focale », lorsque l'utilisateur tente de voir les deux informations simultanément (Oshima et al., 2015). Dans la littérature, la rivalité focale a régulièrement été identifiée comme un problème perceptif important de la RA. Cependant, la plupart de ces études ne font que citer cette problématique sans en évaluer les impacts. Ces études visent à identifier comment atténuer la rivalité focale en améliorant la clarté du contenu en RA, en appliquant de filtres d'accentuation dynamique (Carbone et al., 2020; Cook et al., 2018; Oshima et al., 2016). À notre connaissance, la rivalité focale a fait l'objet de seulement deux études, une sur les performances visuelles (Condino et al., 2019) et une sur la réponse du système nerveux autonome (Nardelli et al., 2020). Dans ces deux études, les participants devaient effectuer une tâche de connexion de points, avec et sans l'utilisation d'un casque de RA transparents. Cette tâche oblige l'œil de l'utilisateur à se concentrer simultanément sur le contenu virtuel (points numérotés) et les objets réels (stylo, règle et papier). Condino et al., (2019) ont constaté que les performances (erreurs et temps de réalisation) étaient significativement moins bonnes avec la RA, mais n'ont pas observé de différence de confort visuel. Ils suggèrent que la RA transparente pourrait ne pas être la plus adaptée pour la réalisation de tâches manuelles. Bien que ces études offrent une analyse intéressante de la rivalité focale, l'impact de ce phénomène optique sur le système visuel est peu développé et se limite à une évaluation subjective de l'inconfort visuel.

2.2.3 La rivalité binoculaire

Comme présenté précédemment, parmi les casques de RA nous trouvons des casques binoculaires et monoculaires. Dans le cas des casques monoculaires, les images virtuelles sont projetées devant un seul des deux yeux de l'utilisateur. Ce type de casque présente l'avantage majeur de pouvoir réduire le poids de l'équipement nécessaire, mais peut également conduire au phénomène de rivalité binoculaire (Blake, 1989). En effet, lorsque l'on présente à chaque œil, deux images très différentes de manière prolongée, il se produit une compétition entre les deux yeux, dénommée « rivalité binoculaire » (voir Bayle et al., (2019) pour une revue récente). Lorsqu'il y a rivalité binoculaire, deux phénomènes peuvent se produire. Soit l'image capturée par un des deux yeux est complètement supprimée et n'est pas traitée par le système visuel (Blake & Logothetis, 2002; Hershberger & et al., 1975), soit les images de l'œil droit et de l'œil gauche sont traitées alternativement (Alais & Blake, 1999; Häkkinen, 2004).

Concernant la mesure de la rivalité binoculaire, il a été observé que les changements de perception sont en corrélation avec les mouvements oculaires. La corrélation entre le nystagmus optocinétique (mouvement oculaire, qui se produit lorsque les yeux bougent beaucoup juste avant la perception d'un changement ne soit perçu) et la rivalité binoculaire est avérée, il est donc utilisé comme un indicateur objectif de la rivalité binoculaire (Fox et al., 1975; Logothetis & Schall, 1990).

De nombreuses études ont évalué l'impact de la rivalité binoculaire se produisant lors de l'exposition à un casque monoculaire. La rivalité binoculaire engendrerait une dégradation des performances visuelles, traduit par une augmentation des temps de réaction et des omissions d'informations (Patterson et al., 2007). La rivalité binoculaire serait également à l'origine d'une fatigue visuelle, avec des symptômes de maux de tête et de nausée (Hershberger & et al., 1975; Knorr et al., 2011).

Notons que ce phénomène de rivalité binoculaire n'intervient pas pour les casques binoculaires comme celui utilisé dans ce travail de thèse.

2.3 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel

2.3.1 Définitions

Dans leur revue, Lambooij et al., (2009), mettent en évidence que dans la littérature plusieurs termes sont utilisés comme synonyme et de façon ambiguë, sans consistance entre les domaines. Nous allons donc dans un premier temps présenter les définitions de chacun de ces termes. L'asthénopie est un terme diagnostique général regroupant la fatigue visuelle et l'inconfort visuel. L'asthénopie peut être concentrée autour des yeux, produire un mal de tête général, ou également se diffuser jusqu'au cou et les épaules. La fatigue visuelle fait référence à une diminution des performances du système visuel humain résultant d'une contrainte ou d'un stress physiologique suite à un effort excessif. La fatigue

visuelle peut donc être mesurée objectivement, tandis que l'inconfort visuel est une appréciation subjective des symptômes associés.

Parmi les symptômes asthénopiques souvent observés, on retrouve des symptômes visuels et oculaires, mais également des symptômes plus généraux.

Symptômes visuels et oculaires :

- vision trouble ou voilée
- myopie temporaire
- vision double
- sensation de lourdeur
- picotements, brulures
- sècheresse oculaire
- rougeur des globes oculaires ou des paupières
- larmes
- paupières qui tremblent

Symptômes généraux :

- céphalées frontales
- sensations de vertige
- maux de tête et à la nuque

2.3.2 Méthodes de mesure de la fatigue visuelle et l'inconfort visuel

De très nombreuses études ont été menées afin d'évaluer la fatigue visuelle ainsi que l'inconfort visuel engendré par la visualisation de contenu par des dispositifs stéréoscopiques.

L'évaluation objective de la fatigue visuelle est réalisée par des mesures optométriques qui peuvent être réalisées de deux façons différentes. La première correspond aux mesures de laboratoires, qui comprend les mesures obtenues avec des instruments optiques qui mesurent directement les indicateurs optométriques, e.g., auto-réfractomètre, oculomètre, haploscope. La deuxième correspond aux mesures cliniques, pour lesquelles la mesure des indicateurs se fait indirectement en utilisant du matériel clinique, tel que des prismes, des lentilles ou des lunettes anaglyphes (voir Neveu (2012) pour une comparaison des approches cliniques et de laboratoires).

De nombreux paramètres optométriques ont été utilisés dans les études sur la fatigue visuelle. Certains sont très souvent utilisés dans les protocoles expérimentaux, comme l'acuité visuelle et l'hétérophorie (déviation latente des axes oculaires) (Fortuin et al., 2011; Lambooj et al., 2009; Mon-Williams & Wann, 1998; Peli, 1998; Sheedy & Bergstrom, 2002), l'amplitude de fusion (également appelée *réserves fusionnelles*) (Emoto et al., 2005; Emoto et al., 2004; Lambooj et al., 2009) et le ratio AC/A (Bobier & McRae, 1996; Eadie et al., 2000; Kozulin, Ames, & McBrien, 2009; Neveu et al., 2016). Cependant d'autres paramètres sont utilisés de façon plus isolée dans la littérature, tels que l'amplitude de la réponse accommodative (Lambooj et al., 2009), les réserves accommodatives

et la sensibilité au contraste (Peli, 1998) ou encore l'acuité stéréoscopique (Kozulin, Ames, & McBrien, 2009; Peli, 1998).

Concernant, les méthodologies d'évaluation de l'inconfort visuel, de nombreux questionnaires subjectifs ont été développés et utilisés pour déterminer l'inconfort visuel produit par des affichages stéréoscopiques. Cependant à notre connaissance, il n'a pas encore été établi de questionnaire communément accepté, qui soit valide, sensible et robuste. Certains questionnaires sont fréquemment utilisés, tels que *Convergence Insufficiency Symtoms Survey* (Fortuin et al., 2011; Lambooi et al., 2009), le *Simulator Sickness Questionnaire* (Häkkinen et al., 2006; Järvenpää & Pölönen, 2009; Sharples et al., 2008), le *Visual Strain Questionnaire* (Järvenpää & Pölönen, 2009; Pölönen et al., 2012) ou encore le *Virtual Reality Symptoms Questionnaire* (Amenós & Knox, 2014; Kozulin, Ames, & Mcbrien, 2009). Par ailleurs, de très nombreuses études utilisent des questionnaires spécifiquement développés pour leur étude, qui diffèrent souvent par le nombre d'items ou l'échelle utilisée pour y répondre, e.g., 5 items (Mon-Williams & Wann, 1998; Shibata, 2002), 29 items (Emoto et al., 2004).

2.3.3 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel provoqués par les dispositifs stéréoscopiques.

Concernant les effets des dispositifs stéréoscopiques sur la fatigue visuelle, les données présentes dans la littérature entrent en contradiction. Ainsi, concernant l'amplitude de fusion, il a été observé, à la fois une diminution de celle-ci (Emoto et al., 2005; Emoto et al., 2004) et une augmentation (Lambooi et al., 2009), ou bien encore qu'elle n'était pas modifiée après utilisation de dispositifs stéréoscopiques (Oohira & Ochiai, 1996). De la même façon, certaines études entrent en contradiction quant à la variation du ratio AC/A, avec des données indiquant une diminution (Eadie et al., 2000), une augmentation (Bobier & McRae, 1996), ou pas de changement (Kozulin, Ames, & McBrien, 2009; Neveu et al., 2016). Enfin, les études qui ont utilisé l'hétérophorie comme indicateur, montrent une exophorie (Mon-Williams & Wann, 1998), une ésophorie (Howarth & Costello, 1997), ou pas de modification de l'hétérophorie (Kozulin, Ames, & McBrien, 2009; Peli, 1998).

Les données de la littérature sur l'inconfort visuel sont davantage congruentes entre elles et montrent que l'utilisation des dispositifs stéréoscopies est associée à des symptômes de fatigue visuelle, tels que la vision floue, la vision double et les maux de tête (Lambooi et al., 2009; Mon-Williams et al., 1993; Shibata et al., 2011). Notons cependant, qu'une dissociation entre mesures objectives et les plaintes subjectives peut être observé (Lambooi et al., 2009; Neveu, 2012; Neveu et al., 2012; Saito, 1992), il semble alors que la combinaison des deux types de mesures soit la plus pertinente à l'étude des effets des dispositifs stéréoscopiques sur la vision binoculaire.

2.3.4 La fatigue visuelle et l'inconfort visuel en RA

En comparaison avec les autres dispositifs stéréoscopique, la fatigue et l'inconfort visuel en RA ont beaucoup moins été étudiés dans la littérature. En effet, dans la littérature, les études présentées précédemment, ont souvent été réalisées avec des dispositifs de laboratoire conçus spécifiquement pour l'étude, tels que des haploscoptes (Eadie et al., 2000; Neveu et al., 2016), des téléstéréoscopes (Bobier & McRae, 1996; Neveu et al., 2010), ou des systèmes de TV 3D (Emoto et al., 2005). Une part des études a été réalisée avec des dispositifs de type casque de RV, mais généralement datant des années 90 (Kooi, 1997; Mon-Williams & Wann, 1998; Nichols, 1999; Peli, 1998). Ainsi peu d'études ont utilisé des systèmes de RA afin d'en étudier les effets sur la vision binoculaire.

Concernant l'étude de l'inconfort visuel en RA, quelques études ont été menées en utilisant des questionnaires. L'inconfort visuel entraîné par le « CONNECT », un prototype de système de RA mobile, a été évalué par un questionnaire sur la fatigue visuelle en 9 items (Arvanitis et al., 2009; Knight et al., 2005). Les résultats de ces études ont montré que l'utilisation du dispositif augmente les symptômes suivants : inconfort visuel, difficulté à focaliser et fatigue visuelle. Wille et al. (2013) ont réalisé une étude avec un casque de RA monoculaire (Heitec MAVUS-System) à l'aide du Visual Fatigue Questionnaire en 16 items, dans laquelle presque tous les scores ont augmenté après utilisation du casque. L'utilisation d'un casque monoculaire (Vuzix M100) et binoculaire (Epson Moverio BT-200) a été évalué par le Simulator Sickness Questionnaire, qui a révélé des scores plus importants de simulator sickness pour ces casques que pour une version papier (Sunwook Kim et al., 2019). Dans l'étude de Gaffary et al. (2017) la fatigue visuelle provoquée par le casque binoculaire HoloLens1 a été comparée à celle d'un casque de RV, à l'aide d'un item unique. Les données obtenues n'ont pas mis en évidence de différence de fatigue entre les deux dispositifs.

Concernant l'évaluation objective de la fatigue visuelle en RA, très peu d'études ont été menées en utilisant des mesures cliniques similaires à celles utilisées avec les autres dispositifs stéréoscopiques. Ellis et al. (1997) ont évalué l'impact d'un dispositif de RA de type *see-through*, sur deux paramètres optométriques : l'acuité visuelle et l'hétérophorie, qui n'ont pas été affectées par l'utilisation du dispositif.

Enfin, une étude a utilisé une combinaison de mesures subjectives (Convergence Insufficiency Symptoms Survey) et objectives (acuité visuelle), mais uniquement dans le but de comparer les effets de deux modes de visualisation avec l'HoloLens.

Parmi ces quelques études, aucune n'a donc à ce jour réalisée une évaluation complète de la fatigue visuelle et de l'inconfort visuel engendrés par un récent casque binoculaire de RA. Étant donné l'utilisation grandissante de ce type de dispositifs, mais également l'intérêt de combiner les mesures objectives et subjectives, il semble pertinent d'utiliser un protocole de test associant des mesures optométriques et des questionnaires tels que

ceux utilisés pour l'étude des dispositifs stéréoscopiques (présentés au début de ce paragraphe).

2.4 Problématique

La fatigue visuelle est une problématique importante associée à l'utilisation de dispositifs stéréoscopiques dont font partie les dispositifs de RA. Cependant, les études sur la fatigue visuelle en RA sont peu, voire absentes de la littérature. Bien que plusieurs causes de fatigue visuelle aient été identifiées en RA, telles que le conflit accommodation-vergence et la rivalité focale, encore peu de contributions mesurant la fatigue visuelle et l'inconfort visuel à l'aide de protocoles complets ont été proposées avec des casques de RA de nouvelle génération.

Face à l'évolution constante des usages des nouvelles technologies, l'ANSES a publié en 2014 un rapport sur les risques sanitaires potentiellement induits par les technologies audiovisuelles 3D (e.g., visiocasques, écrans auto-stéréoscopiques, lunettes 3D) et un autre en 2021 sur les technologies de RV et RA (ANSES, 2014, 2021). Ces rapports concluent que l'effet sanitaire le plus important est la fatigue visuelle, due notamment au conflit accommodation vergence. L'ANSES a également identifié l'existence de population à risque. Selon ces rapports les personnes sujettes à des troubles oculomoteur (e.g., déficits vestibulaires, hétérophorie, insuffisance de vergence, strabisme accommodatif) ou pathologie oculaire (e.g., cataracte, glaucome) peuvent faire partie des populations à risque, car elles pourraient présenter un seuil de tolérance plus bas au conflit accommodation vergence. L'ANSES recommande ainsi dans son rapport la mise en œuvre de travaux auprès de population présentant des troubles potentiels tels que des insuffisances de convergence, anisométries, phories, amblyopies, strabismes, etc...

Dans les prochains paragraphes, nous présenterons deux études réalisées afin d'apporter des premiers éléments de réponse à la question de la fatigue visuelle et de l'inconfort visuel engendrés par l'utilisation de la RA. Ces deux études ont été menées auprès de populations différentes afin d'obtenir des résultats valides pour la population générale, mais également pour les populations à risque.

2.5 Etude 1 - Effet de la RA sur la vision binoculaire : évaluation de la fatigue visuelle et de l'inconfort visuel

Cette étude a été publiée dans la revue Displays (Drouot, Le Bigot, Bolloc, et al., 2021).

2.5.1 Introduction

L'état de l'art proposé dans le paragraphe 2.3, montre que la question de l'impact des dispositifs stéréoscopiques sur le système oculomoteur et la vision binoculaire a fait l'objet de nombreuses études. Bien que les méthodologies utilisées et les résultats observés diffèrent parfois, certaines données suggèrent que l'utilisation de dispositifs stéréoscopiques ne reste pas sans conséquences pour le système oculomoteur.

Ainsi, dans un contexte où la RA est de plus en plus utilisée en milieu professionnel et industriel, la question de la santé des opérateurs est centrale. De très nombreuses études ont évalué l'efficacité de l'utilisation de la RA pour la réalisation de tâches d'assemblage (voir paragraphe 4.1). Cependant, les études actuelles sur la RA en milieu industriel sont focalisées sur les avantages concernant le temps de réalisation, le nombre d'erreur et la charge mentale (voir paragraphe 4.2.1 pour une définition). En comparaison, très peu d'études ont examiné les effets potentiels de la RA sur le système visuel et en particulier la fatigue visuelle et l'inconfort visuel.

Dans le paragraphe 2.3.2, il a été mis en avant que l'évaluation de l'asthénopie par une combinaison de méthodes objectives et subjectives n'avait pas encore été appliquée à l'étude de la RA. Les études ayant évalué certaines problématiques oculomotrices liées à la RA, se sont focalisées sur l'impact que son utilisation pouvait avoir sur les performances visuelles et non sur les paramètres du système oculomoteur. Condino et al., (2019) ont étudié l'impact de la rivalité focale et du conflit accommodation vergence sur la charge de travail perçue, le confort et les performances visuelles (tâche de dessin). Gabbard et al., (2019) ont évalué l'effet du *context* et *focal distance switching* sur les performances visuelles (tâche de recherche visuelle) et la fatigue visuelle (1 item unique).

Il n'existe pas à notre connaissance, d'études mesurant la fatigue visuelle et l'inconfort visuel à l'aide d'un protocole de tests optométriques complets après l'utilisation d'un casque de RA de nouvelle génération.

Dans le contexte industriel de cette thèse, il est particulièrement important d'identifier dans quelle mesure ces problématiques visuelles associées à l'utilisation de la RA pourraient potentiellement avoir un impact sur le système visuel des opérateurs travaillant avec des casques de RA. Dans ce but, nous avons défini pour cette étude un environnement de laboratoire et une tâche d'assemblage cohérents avec un poste d'assemblage de l'usine elm.leblanc. Dans le poste d'assemblage choisi comme modèle (voir Figure 19), les opérateurs effectuent des cycles de 3 minutes au cours desquels ils doivent assembler un ensemble de petites pièces. Les différentes étapes d'assemblage à suivre sont détaillées dans un livret papier contenant des instructions textuelles et des photos. Ce support

papier est placé en face de l'opérateur, au-dessus des boîtes contenant les pièces à utiliser et de la zone où l'opérateur effectue l'assemblage manuel.



Figure 19 - Poste d'assemblage de composant dans l'usine elm.leblanc. Les instructions papiers (en haut à gauche de l'image) seront remplacées par des instructions en réalité augmentée.

Pour assurer la cohérence entre notre procédure expérimentale en laboratoire et l'environnement de travail d'elm.leblanc, il a été demandé aux participants d'effectuer une tâche d'assemblage avec des blocs de Lego®, qui implique également une tâche manuelle avec manipulation de petites pièces. Ce type de tâche (i.e., l'assemblage de Lego) a été utilisé dans plusieurs études afin d'évaluer les effets de la présentation d'instruction d'assemblage en RA (Blattgerste et al., 2017; Funk et al., 2015; Loch et al., 2016). Les modèles Lego sélectionnés dans cette étude nécessitaient également 3 à 4 minutes pour être assemblés. Enfin, le poste d'assemblage du participant était similaire à celui de l'usine, puisque les instructions en RA étaient affichées en face du participant, au-dessus de l'endroit où les blocs de Lego sont disponibles et de la zone d'assemblage.

En accord avec de nombreuses études sur l'évaluation des dispositifs stéréoscopiques (Kozulin, Ames, & McBrien, 2009; Lambooi et al., 2009; Mon-Williams et al., 1993; Peli, 1998; Rushton et al., 1994), nous avons réalisé une étude dans laquelle il a été demandé aux participants d'effectuer des assemblages de Lego pendant 30 minutes (Bobier & McRae, 1996; Knight & Baber, 2005; Miles et al., 1987), à l'aide d'instructions papier ou d'instruction en RA (Friedrich, 2002; Tang et al., 2003; Wiedenmaier et al., 2003). Afin d'évaluer l'impact potentiel de la RA sur le système visuel, nous avons appliqué une procédure similaire à celles qui ont déjà été largement utilisées pour l'étude des dispositifs

stéréoscopiques, en utilisant des mesures avant et après utilisation de la RA (Peli, 1998; Sreenivasan & Bobier, 2015; Wann & Mon-Williams, 2002). Ainsi la fatigue visuelle a été évaluée avec des mesures optométriques classiques et l'inconfort visuel par le *Virtual Reality Symptoms Questionnaire* (VRSQ; Ames et al., 2005).

2.5.2 Méthode

Participants

Vingt-six participants (7 femmes, 19 hommes) ont été recrutés pour cette étude, ils étaient âgés de 24 à 46 ans ($M=28.69$, $ET=4.94$). Les participants ont utilisé leur correction optique habituelle (lunettes ou lentilles de contact). Les critères d'exclusion étaient les suivants : acuité visuelle monoculaire inférieure à 10/10, présence d'une disparité de fixation, présence ou antécédant de pathologie oculaire. Selon ces critères, 3 participants ont été exclus de l'analyse des résultats. Des analyses statistiques ont ainsi été réalisées sur les 23 participants (6 femmes, 17 hommes, $M=28.74$, $ET=5.16$). L'étude a été réalisée dans les locaux du département optique (Espace Arago IMT-Atlantique). Avant de participer, tous les volontaires ont été pleinement informés de la procédure expérimentale et ont signé un formulaire de consentement éclairé. L'étude a été menée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki.

Matériel

12 modèles différents de Lego (voir Figure 20) ont été utilisés pour cette étude. Les différents modèles nécessitaient entre 11 et 37 étapes d'assemblage ($M=20$). Compte tenu du nombre d'étapes à suivre, il n'était pas possible pour les participants d'effectuer l'assemblage des modèles sans utiliser chacune des étapes d'instructions. L'ordre dans lequel ces modèles étaient présentés aux participants était toujours le même. Il y avait assez de modèles pour qu'ils ne soient assemblés qu'une seule fois. Les participants ont effectué la tâche d'assemblage debout sur une table de 97 cm de haut, devant un mur situé à 81 cm de distance (voir Figure 23). La table et le mur étaient éclairés de manière homogène (100 lux).



Figure 20 - Exemples de modèles de Lego à assembler.

Dans la condition contrôle, les instructions d'assemblage étaient présentées en version papier, dans le livret d'instruction fourni par Lego® (20x12cm). Dans la condition RA

(voir Figure 23), une interface virtuelle présentée dans l'HoloLens 1 permettait au participant de voir les différentes étapes d'instruction, ainsi que de passer à l'étape suivante ou précédente à l'aide de deux flèches. Dans une courte phase précédant la tâche d'assemblage, il a été expliqué comment positionner de manière optimale le dispositif de RA sur la tête du participant pour permettre une bonne interaction avec l'interface. En ce qui concerne l'utilisation de l'HoloLens, une comparaison peut être faite avec une souris d'ordinateur. Un point blanc suit les mouvements de la tête de l'utilisateur et agit comme un curseur, et un geste de la main est utilisé pour cliquer et passer les différentes étapes. L'interface virtuelle était placée devant le participant, projetée à 3 m, avec une distance focale fixe à 2 m et avait une taille dans l'environnement réel de 1m x 0,70m (soit environ 19° x 13°).

Procédure

Avant le début de l'étude, les participants ont donné des informations sur leur âge, les antécédents possibles de pathologie oculaire, de chirurgie ainsi que de problèmes de dos ou de cou. Au cours de l'étude, chaque participant devait réaliser une tâche d'assemblage sous deux conditions, avec des instructions en RA ou avec des instructions en papier désignées respectivement par « RA » et « Contrôle ». Les tâches d'assemblage devaient être réalisées au cours de deux sessions séparées avec un intervalle de 1 à 6 jours. La moitié des participants a réalisé la condition RA le premier jour et l'autre a réalisé la condition contrôle. Au cours des deux sessions, des mesures optométriques ont été effectuées pendant 15 minutes, avant et après la tâche d'assemblage.

Mesures optométriques

Certaines mesures optométriques ont été effectuées à l'aide du Binoculus (Orthoptica®, <http://orthoptica.com/>). Le Binoculus est une plateforme numérique permettant d'afficher des tests optométriques 2D et 3D (Figure 21), elle présente une forte corrélation avec les tests cliniques classiques (Lamard et al., 2016). Les autres mesures ont été réalisées avec du matériel clinique fourni par le service d'ophtalmologie du CHRU de Brest. Le choix des tests optométriques et leur apprentissage ont été réalisés sous la validation d'une orthoptiste du CHRU de Brest.

À chaque session de mesure, donc avant et après chaque phase d'assemblage, les paramètres optométriques suivants ont été mesurés dans l'ordre indiqué ci-dessous :

1. Acuité visuelle monoculaire

La plateforme Binoculus a été utilisée pour mesurer l'acuité visuelle de loin (œil droit puis œil gauche). Une échelle à progression logarithmique était présentée sur un écran à 3m du participant. L'acuité visuelle de près a été mesurée pour chaque œil (droit puis gauche) avec une échelle de Parinaud présentée à 33cm du participant.

2. Acuité stéréoscopique

L'acuité stéréoscopique a été évaluée avec la plateforme Binoculus et des lunettes 3D Eyes3Shut (voir Figure 21). Ce test est similaire au test de Wirt, il mesure la vision stéréoscopique minimale. À chaque étape du test, un triangle contenant trois cercles est présenté. L'un des cercles (dont la position est aléatoire) présente une disparité horizontale, qui donne lieu à une sensation de profondeur. Le participant doit indiquer oralement à l'expérimentatrice la position de ce cercle. La dernière valeur exacte est retenue comme celle de la vision stéréoscopique minimale. Le premier angle de stéréopsie est de 800 secondes d'arc, et diminue progressivement en prenant les valeurs 200, 120, 80, 60, 40 respectivement.

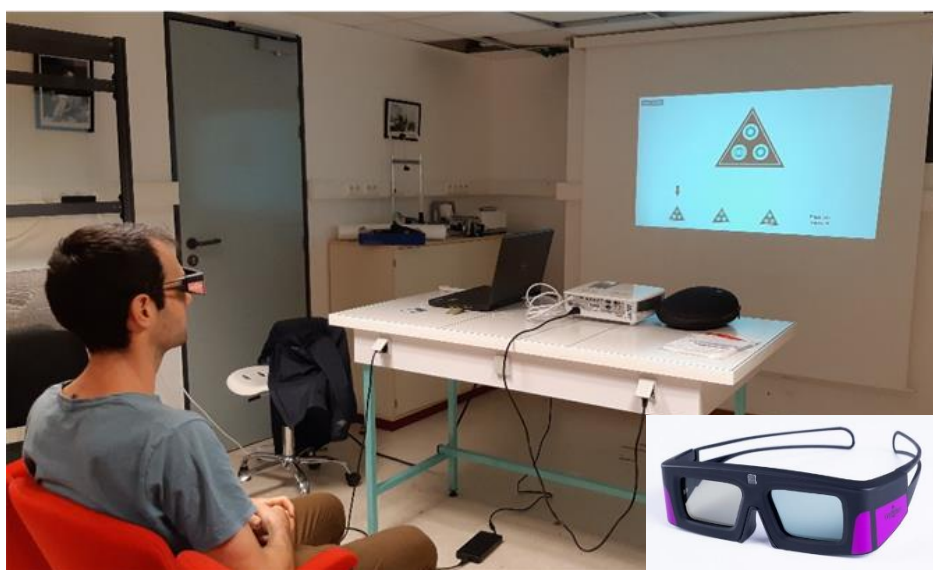


Figure 21 - Test de stéréoacuité avec le Binoculus et les lunettes 3D Eyes3Shut (Espace Arago - IMT Atlantique).

3. Disparité de fixation verticale

La présence d'une disparité de fixation a été évaluée par une planche de disparité de fixation (Rousseau, 2002) (voir figure 22). Cette planche est présentée à 50cm du participant. Elle est présentée de telle manière que les barres rouges et vertes sont perçues



Figure 22 - Test de disparité : planche de test (gauche) et lunettes anaglyphes (droite).

verticalement. Le participant porte des lunettes anaglyphes et doit indiquer s'il perçoit un décalage, même léger, dans l'alignement des barres rouges et vertes du test.

4. Phorie verticale

La présence d'une phorie verticale a été évaluée par un examen sous écran alterné. L'examen sous écran, consiste à rompre le mécanisme de fusion des deux yeux, par occlusion d'un œil et à observer s'il y a une déviation dans l'axe oculaire. Pour la phorie de loin, nous avons demandé au participant de regarder un point affiché à l'écran à 3m. Pour la phorie de près, une cible accommodative était placée à 33cm du participant. Lorsqu'une déviation était observée (ésophorie ou exophorie), une mesure de cette déviation était réalisée à l'aide d'une barre de prisme de Barrens.

5. Amplitude de fusion (réserves fusionnelles)

La barre de prisme de Berrens a été utilisée pour mesurer l'amplitude de fusion. Pour cette mesure, nous avons demandé aux participants de regarder un point de fixation (affiché à 3m pour la mesure de loin et à 40cm pour la mesure de près). Nous avons placé la barre de prisme devant un œil en commençant par le plus petit prisme et nous avons augmenté la valeur du prisme jusqu'à ce que le patient ne puisse plus compenser la déviation. Le prisme qui provoque la rupture de la fusion donne la valeur de la vergence fusionnelle. Nous avons mesuré l'amplitude de fusion en divergence, puis en convergence, d'abord de loin, puis de près.

6. Amplitude d'accommodation monoculaire

Nous avons utilisé la méthode « Push-Up » (Chen & O'Leary, 1998), dans laquelle le participant doit regarder un texte placé à 0,4m qui correspond à 80% de l'acuité visuelle de près (texte 4 de l'échelle de Parinaud). Après avoir fermé un œil, le participant rapproche lentement et progressivement l'échelle, afin d'induire un changement régulier de la demande accommodative. Le participant doit s'arrêter dès qu'il perçoit le premier flou constant. L'amplitude d'accommodation est mesurée à l'aide d'une règle. Cette procédure est répétée 3 fois pour chaque œil.

7. Convergence accommodative

La convergence accommodative (ratio AC/A) a été déterminée à l'aide de la méthode de la phorie (Fry & Haines, 1940; Tait, 1933). Le rapport AC/A calculé a été obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$AC/A = DIP + (D'-D) / N$$

où DIP est la distance inter-pupillaire en centimètres, D' correspond à la phorie de près, D à la phorie de loin en dioptries et N à la distance de fixation de près en dioptries (i.e., 3 D).

Questionnaire

Après réalisation des mesures optométriques, les symptômes d'inconfort visuel ont été évalués à l'aide du VRSQ (Ames et al., 2005). Ce questionnaire (présenté en Annexe 2) a été élaboré à partir des symptômes les plus fréquemment signalés à la suite d'une visualisation en RV. Il est composé de 13 items, 8 symptômes généraux et 4 symptômes oculaires (en raison d'une proximité sémantique en français entre « fatigue des yeux » et « fatigue oculaire », seul l'item « fatigue oculaire » a été utilisé). Ce questionnaire évalue les symptômes à l'aide d'une échelle en 7 points (avec 0 pour « aucun », 1 et 2 pour « léger », 3 et 4 pour « modéré », 5 et 6 pour « sévère »).

Tâche d'assemblage

Dans les deux conditions (i.e., RA et Contrôle), les participants devaient assembler différents modèles de Lego pendant 30 minutes. Le but de cette expérience étant d'évaluer l'impact sur la vision et non les performances, aucune pression de temps n'a été imposée aux participants. Les participants assemblaient donc à leur propre rythme les modèles de Lego. Une fois un modèle terminé, ils réalisaient le suivant, dans la limite des 12 modèles proposés.

Dans la condition RA (voir Figure 23), l'interface virtuelle permettait au participant de voir les différentes étapes d'instruction. Dans cette condition, le changement de regard du sujet entre les instructions dans le casque de RA et les Lego impliquait une modification de la demande accommodative, avec une différence de distance focale entre 0,70m (1,43 D) et 3m (0,33D).

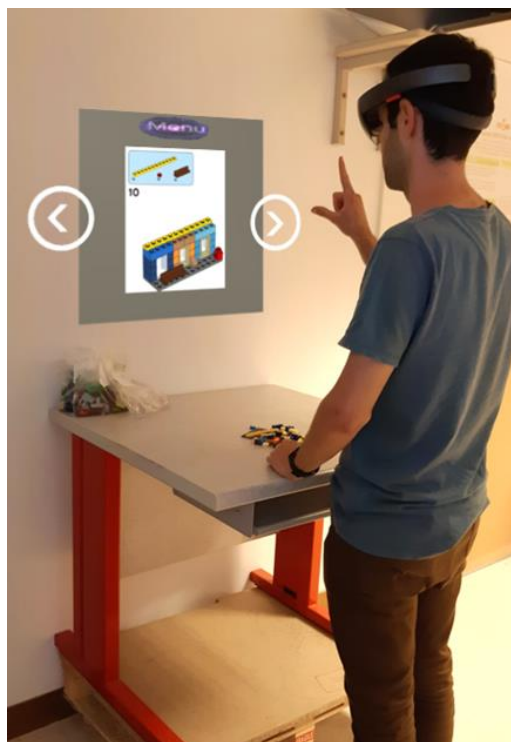


Figure 23 -Participant utilisant l'interface virtuelle dans la condition RA. Afin de représenter ce que les participants voient dans l'HoloLens, une simulation de l'interface RA a été ajoutée à l'image.

Dans la condition contrôle, les instructions étaient présentées sur un livret papier Lego. Il était placé sur la table, sur le côté gauche des Lego. Comme les instructions étaient les mêmes qu'en condition RA, le nombre d'étapes d'instruction et le taux de changement sont les mêmes. Cependant, dans la condition contrôle, le changement du regard du sujet entre les instructions et les Lego, n'impliquait pas de changement de la demande accommodative.

2.5.3 Résultats

Les analyses statistiques ont été effectuées avec JASP (JASP Team, 2019). Une analyse de la variance (ANOVA) paramétrique intra-sujet 2x2, avec les facteurs conditions d'instructions (RA, contrôle) et une session de test (avant, après) a été calculée pour chaque paramètre, afin d'évaluer si la condition RA entraîne des changements dans la vision binoculaire et la fatigue, et si ces changements sont différents de ceux entraînés en condition contrôle. La condition de normalité des résidus n'était pas respectée. Ainsi, bien que les ANOVA paramétriques intra-sujet soient robustes à ce type de violation (Howell, 2008), nous avons réalisé des ANOVA non paramétriques en utilisant la méthode *adjusted rank transformed* (ART) (Leys & Schumann, 2010). Le *pattern* (i.e., l'arrangement global des résultats) de résultats observés avec l'ANOVA ART étant identique à celui avec l'ANOVA paramétriques, nous ne présentons que les résultats de l'approche paramétrique.

Les données brutes obtenues dans cette étude, incluant les mesures optométriques et les scores subjectifs du VRSQ, sont disponibles sur Mendeley Data (<http://dx.doi.org/10.17632/rpsvy6b23g.1>, Drouot (2020)).

Mesures optométriques (fatigue visuelle)

La Table 1 présente les moyennes et écarts-types de chaque test optométrique, en fonction du type d'instructions (i.e., RA et contrôle), avant et après la tâche d'assemblage.

Les résultats montrent un effet d'interaction significatif entre le type d'instruction et la session de tests sur l'acuité stéréoscopique, $F_{1,21} = 12.03$, $p = 0.028$, $\eta_p^2 = 0.36$. L'analyse des effets simples révèle une différence significative d'acuité stéréoscopique entre les deux sessions de test, pour la condition RA, $F_{(1,21)} = 9.54$, $p = 0.006$, mais pas pour la condition contrôle $F_{(1,21)} = 3.30$, $p = 0.08$. Ainsi, en condition RA, l'acuité stéréoscopique est meilleure après la tâche d'assemblage qu'avant, tandis qu'il n'y a pas de différence après l'assemblage en condition contrôle (Figure 24).

Un effet principal de la session de test est observé sur l'amplitude de fusion en convergence de loin. L'amplitude de fusion est plus élevée après l'assemblage qu'avant, $F_{(1,21)} = 6.40$, $p = 0.019$, $\eta_p^2 = 0.23$. Concernant l'amplitude de fusion en convergence de près, les analyses montrent un effet principal du type d'instruction, l'amplitude de fusion est plus

faible dans la condition contrôle que pour la condition RA $F_{(1, 21)} = 6.36$, $p = 0.019$, $\eta_p^2 = 0.23$.

Table 1 - Moyennes et écarts-types des tests optométriques, selon le type d'instructions, avant et après la tâche d'assemblage.

Paramètres optométriques	Session de test	
	Avant M (SD)	Après M (SD)
Acuité visuelle de loin (x/10th)		
RA	9.96 (0.21)	10.00 (0.00)
Contrôle	9.98 (0.10)	10.00 (0.00)
Acuité visuelle de près (x/10th)		
RA	10.00 (0.00)	10.00 (0.00)
Contrôle	10.00 (0.00)	10.00 (0.00)
Acuité stéréoscopique (arc sec)		
RA	55.00 (20.18)	47.27 (15.79) **
Contrôle	50.00 (16.04)	54.55 (21.54)
Phorie vertical de loin (D)		
RA	0.00 (0.85)	-0.10 (0.73)
Contrôle	-0.17 (0.83)	-0.17 (0.83)
Phorie vertical de près (D)		
RA	-0.17 (1.59)	-0.10 (1.28)
Contrôle	-0.35 (1.30)	-0.35 (1.77)
Amplitude de fusion		
Divergence de loin (D)		
RA	6.00 (2.00)	6.35 (2.23)
Contrôle	6.35 (2.31)	6.61 (2.86)
Convergence de loin (D)		
RA	16.52 (6.68)	18.83 (9.24)
Contrôle	16.56 (7.51)	17.96 (6.72)
Divergence de près (D)		
RA	10.61 (5.06)	11.74 (4.53)
Contrôle	10.26 (4.53)	10.70 (4.54)
Convergence de près (D)		
RA	25.52 (8.88)	25.04 (9.43)
Contrôle	22.17 (8.26)	23.13 (8.76)
Amplitude d'accommodation (cm)		
RA	15.50 (3.66)	15.79 (6.54)
Contrôle	15.41 (3.83)	15.51 (3.60)
Convergence accommodative (AM/D)		
RA	6.20 (0.52)	6.26 (0.47)
Contrôle	6.20 (0.45)	6.20 (0.53)

Les astérisques font référence à une différence significative entre la session avant et après. * significatif à 0.05; ** significatif à 0.01

Pour toutes les autres mesures optométriques, aucun des effets principaux ou d'interaction n'étaient significatifs (tous les $p > 0.062$).

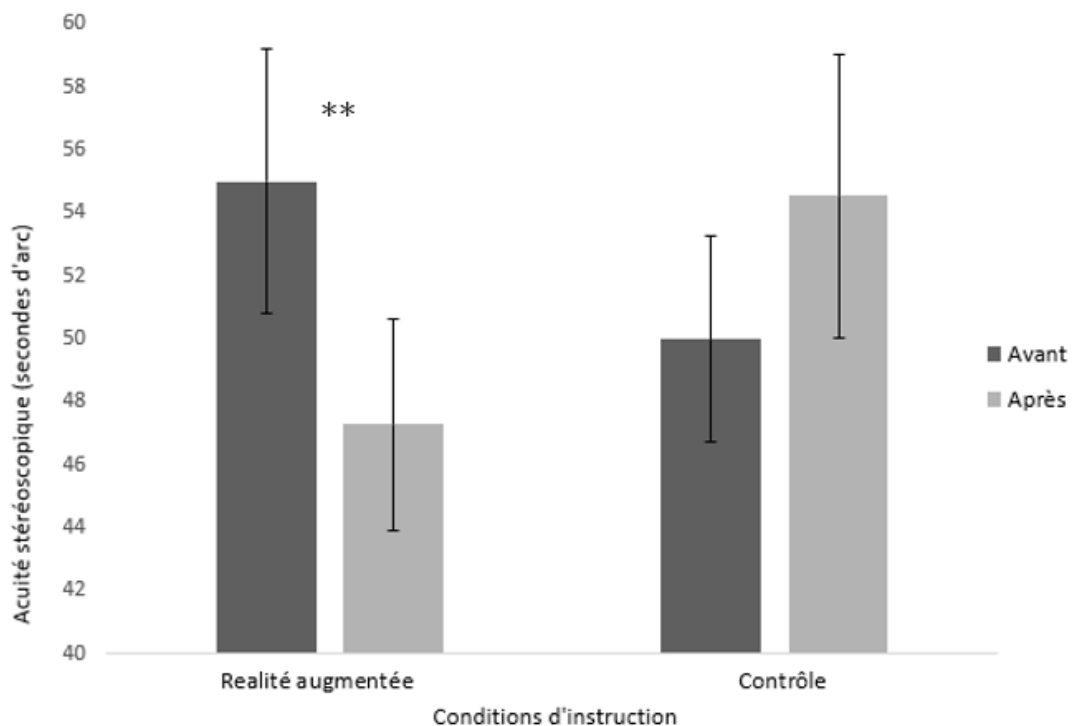


Figure 24 - Scores moyens d'acuité stéréoscopique en secondes d'arc, en condition RA et contrôle, avant et après la tâche d'assemblage. Les barres d'erreur représentent l'écart type. ** différence significative à 0.01.

Questionnaires subjectif (inconfort visuel)

La Table 2 présente les moyennes et écarts-types pour chaque symptôme du VRSQ, en fonction du type d'instructions (i.e., RA et contrôle), avant et après la tâche d'assemblage.

Symptôme « Vision floue » (Figure 25a)

Un effet d'interaction significatif est observé entre le type d'instruction et la session de test sur les scores de vision floue, $F_{(1, 22)} = 4.31$, $p = 0.050$, $\eta_p^2 = 0.16$. L'analyse des effets simples montre que les scores de vision floue étaient significativement différents entre les deux sessions, en condition RA, $F_{(1, 22)} = 5.46$, $p = 0.029$, mais pas en condition contrôle $F_{(1, 22)} = 0.32$, $p = 0.58$. Après l'assemblage réalisé en condition RA, les participants ont rapporté des scores plus élevés qu'avant. Un effet principal du type d'instruction est observé pour le symptôme de vision floue, avec des participants rapportant des scores plus élevés pour la condition RA que la condition contrôle, $F_{(1, 22)} = 7.01$, $p = 0.015$, $\eta_p^2 = 0.24$. Un effet principal de la session de test a également été observé, indiquant des scores de vision floue plus faible avant l'assemblage qu'après, $F_{(1, 22)} = 4.43$, $p = 0.047$, $\eta_p^2 = 0.17$.

Table 2 - Moyennes et écarts-types pour chaque symptôme du Virtual Reality Symptoms Questionnaire, selon le type d'instructions (i.e., RA et contrôle), avant et après la tâche d'assemblage.

Symptômes	Session de test	
	Avant M (SD)	Après M (SD)
Inconfort général		
RA	0,44 (0,79)	1,83 (1,44)
Contrôle	0,57 (0,95)	1,35 (2,27)
Fatigue		
RA	1,22 (1,24)	1,87 (1,25)
Contrôle	0,91 (0,95)	0,96 (1,14)
Ennui		
RA	0,13 (0,34)	0,78 (1,09)
Contrôle	0,13 (0,34)	0,35 (0,57)
Somnolence		
RA	0,52 (0,67)	0,70 (0,88)
Contrôle	0,44 (0,84)	0,35 (0,65)
Mal de tête		
RA	0,30 (0,64)	0,96 (1,15) **
Contrôle	0,39 (0,89)	0,48 (0,85)
Vertiges		
RA	0,04 (0,21)	0,30 (0,77)
Contrôle	0,09 (0,29)	0,09 (0,29)
Difficulté de concentration		
RA	0,22 (0,42)	0,44 (0,66)
Contrôle	0,22 (0,52)	0,39 (0,66)
Nausée		
RA	0,00 (0,00)	0,09 (0,42)
Contrôle	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Yeux irrités		
RA	0,35 (0,49)	0,96 (1,02) ***
Contrôle	0,52 (0,85)	0,70 (0,93)
Fatigue visuelle		
RA	0,74 (0,92)	1,74 (1,36)
Contrôle	0,87 (1,10)	1,13 (1,18)
Vision floue		
RA	0,17 (0,39)	0,52 (0,79) *
Contrôle	0,13 (0,34)	0,17 (0,39)
Difficulté à focaliser		
RA	0,22 (0,42)	0,48 (0,79)
Contrôle	0,17 (0,39)	0,13 (0,34)

Les astérisques font référence à une différence significative entre la session avant et après. * significatif à 0.05; ** significatif à 0.01; *** significatif à 0.001

Symptôme « Yeux irrités » (Figure 25b)

Un effet d'interaction significatif est observé entre le type d'instruction et la session de test sur les scores de yeux irrités, $F_{(1, 22)} = 7.01$, $p = 0.015$, $\eta_p^2 = 0.24$. L'analyse des effets simples montre que les scores de yeux irrités étaient significativement différents entre les deux sessions, en condition RA, $F_{(1, 22)} = 13.92$, $p = 0.001$, mais pas en condition contrôle $F_{(1, 22)} = 0.35$, $p = 0.26$. En condition RA, les scores étaient plus élevés après l'assemblage qu'avant. Les analyses montrent un effet principal de la session de test, les symptômes sont plus élevés après la tâche d'assemblage qu'avant, $F_{(1, 22)} = 8.63$, $p = 0.008$, $\eta_p^2 = 0.28$.

Symptôme « Maux de tête » (Figure 25c)

Un effet d'interaction significatif est observé entre le type d'instruction et la session de test sur les scores de maux de tête, $F_{(1, 22)} = 5.45$, $p = 0.029$, $\eta_p^2 = 0.20$. L'analyse des effets simples montre que les scores de maux de tête étaient significativement différents entre les deux sessions, en condition RA, $F_{(1, 22)} = 11.20$, $p = 0.003$, mais pas en condition contrôle $F_{(1, 22)} = 0.39$, $p = 0.54$. En condition RA, les scores étaient plus élevés après l'assemblage qu'avant. Un effet principal de la session de test est observé, avec des symptômes plus élevés après qu'avant la tâche d'assemblage $F_{(1, 22)} = 9.72$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.31$.

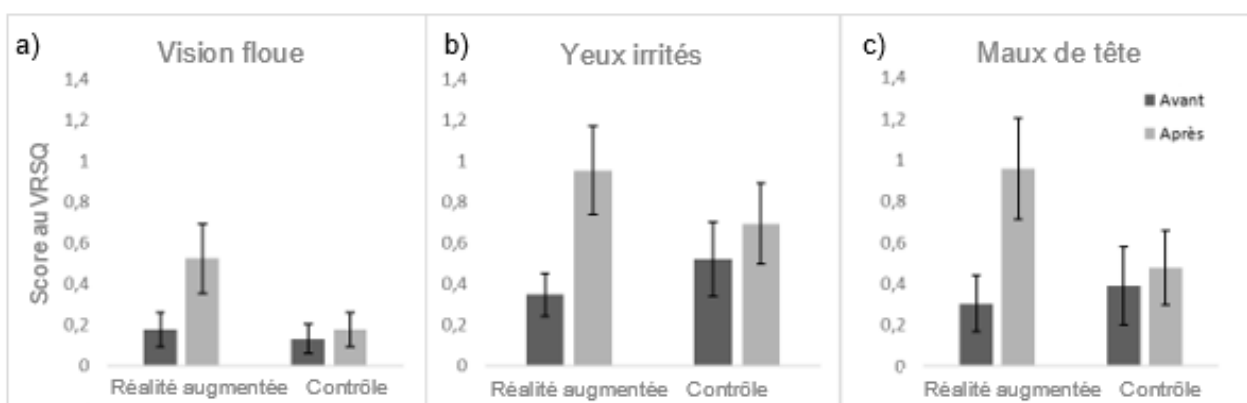


Figure 25 - Scores moyens de vision floue (a), yeux irrités (b), et maux de tête (c), en condition RA et contrôle, avant et après la tâche d'assemblage. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

Symptôme « Fatigue »

Les résultats montrent un effet principal du type d'instruction, avec des scores plus élevés en condition RA qu'en condition contrôle, $F_{(1, 22)} = 7.66$, $p = 0.011$, $\eta_p^2 = 0.26$. Un effet principal de la session de test est également observé, avec des scores de fatigue plus élevés après l'assemblage qu'avant $F_{(1, 22)} = 7.66$, $p = 0.011$, $\eta_p^2 = 0.26$.

Symptômes « Inconfort général, ennui, vertiges, difficulté de concentration, fatigue visuelle »

Un effet principal de la session de test a été retrouvé pour ces cinq symptômes, avec des scores plus élevés après l'assemblage : Inconfort général ($F_{(1, 22)} = 16.46$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.42$), ennui ($F_{(1, 22)} = 12.50$, $p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.36$), vertiges ($F_{(1, 22)} = 5.31$, $p = 0.030$, $\eta_p^2 = 0.20$), difficulté de concentration ($F_{(1, 22)} = 5.75$, $p = 0.029$, $\eta_p^2 = 0.21$), fatigue visuelle ($F_{(1, 22)} = 23.36$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.51$). Aucun effet principal du type d'instruction ou effet d'interaction n'a été observé pour ces symptômes (tous les $p > 0.058$).

Symptôme « Somnolence, nausée, difficulté à focaliser »

Pour ces trois symptômes, aucun effet principaux et d'interaction n'ont été observé (tous les $p > 0.057$).

2.5.4 Discussion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer si l'utilisation de la RA comme support de présentation d'instruction pour la réalisation d'une tâche d'assemblage, pouvait avoir un effet négatif sur le système visuel des individus. Nous avons développé une étude avec des mesures de la fatigue visuelle (9 mesures optométriques) et de l'inconfort visuel (scores au VRQS) avant/après afin de comparer les effets des instructions en RA et en papier.

Pour la plupart des paramètres optométriques évalués, aucune différence statistiquement significative n'a été constatée après l'utilisation de la RA. Seule la stéréoacuité s'est améliorée de manière significative après l'utilisation de la RA et non après l'utilisation du papier. Le fait que l'acuité stéréoscopique s'améliore peut suggérer un effet d'entraînement dû à l'utilisation de la RA. Certaines études ont d'ailleurs montré de façon cohérente avec nos résultats, que la stéréoacuité pouvait être améliorée par l'utilisation d'un jeu dans un environnement de RV. Cependant, ces études impliquaient généralement des stimuli spécifiquement conçus pour l'entraînement visuel (Vedamurthy et al., 2016; Žiak et al., 2017). Par ailleurs, la différence de stéréoacuité obtenue dans la présente étude est trop faible pour être considérée comme cliniquement significative. En effet, la différence est inférieure à la disparité utilisée comme seuil entre les différents niveaux d'acuité dans le test clinique. L'utilisation d'autres tests de stéréoacuité ayant des seuils plus faibles pourrait être intéressante pour évaluer s'il y a effectivement une adaptation de la stéréoacuité après visualisation de contenu en RA.

Les résultats ont également montré des effets sur l'amplitude de fusion en convergence. Concernant, l'effet de la session de test observé pour la convergence de loin, il pourrait s'expliquer par un effet d'entraînement. En effet, l'amélioration de l'amplitude de fusion lors de la session « après », pourrait être expliquée par le fait qu'elle a déjà été évaluée (et ainsi entraînée) lors de la session « avant ». Pour l'effet sur la convergence de près,

l'effet principal du type d'instructions qui a été observé, peut s'expliquer par une importante différence des scores obtenus entre les mesures « avant » RA et « avant » contrôle.

Dans la présente étude, aucun changement statistiquement significatif des paramètres optométriques n'a été constaté, ni pour les instructions en RA, ni pour les instructions papier. Ainsi, aucune dégradation significative du système oculomoteur spécifique à la visualisation du contenu en RA n'a été observée après 30 minutes d'utilisation. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par Hirota et al., (2019) et Peli (1998). Cependant, notons que ces résultats sont valables pour le dispositif de RA utilisé dans notre étude (i.e., HoloLens 1), ce qui pourrait expliquer que nos résultats soient divergents avec certaines études réalisées avec d'autres dispositifs d'affichages stéréoscopiques (e.g., Emoto et al., 2004; Mon-Williams et al., 1993; Neveu et al., 2010; Shibata, 2002 ; voir paragraphe 2.3.3 pour une revue).

L'évaluation des symptômes subjectifs d'inconfort par le VRSQ, a révélé quant à elle des différences significatives entre les deux conditions d'instructions. En effet, l'exécution de l'assemblage manuelle a conduit à une augmentation de certains symptômes, avec des instructions en RA et non avec les instructions papier. Spécifiquement après l'utilisation de la RA, les participants ont signalé une vision plus floue, des yeux irrités et des maux de tête. Cependant, notons que les scores subjectifs restent faibles et restent restreints à la catégorie de symptômes « légers ». L'augmentation de cette évaluation subjective est cohérente avec les résultats précédents rapportés pour divers affichages stéréoscopiques (Costello & Howarth, 1996; Howarth & Costello, 1997; Simon Rushton et al., 1994). L'apparition de ces symptômes lors de l'utilisation d'instructions en RA, peut s'expliquer par la différence de demande accommodative entre les deux conditions d'instructions. En effet, la position des instructions RA induit des changements accommodatifs entre les instructions et les Lego, ce qui n'est pas le cas avec les instructions papier. Par ailleurs, l'augmentation de ces symptômes subjectifs n'est pas confirmée par des mesures optométriques. Par exemple, l'utilisation de la RA est associée à une augmentation des symptômes de vision floue, mais sans diminution de l'amplitude d'accommodation ou de l'acuité visuelle. Cet écart entre les mesures subjectives et objectives a déjà été observé dans d'autres études sur les dispositifs stéréoscopiques, qui ont suggéré une différence entre la fatigue physiologique et l'inconfort subjectif (Lambooi et al., 2007; Saito, 1992). Ainsi, la combinaison des deux types de mesures semble nécessaire pour avoir une évaluation complète de l'impact de la RA.

L'effet principal de la session de test observé pour la plupart des symptômes subjectifs, suggère que la tâche d'assemblage en elle-même était responsable d'une augmentation de symptômes d'inconfort général, d'ennui, des vertiges, des difficultés de concentration et de fatigue visuelle. Ces symptômes d'inconfort visuel semblent être inhérents à la réalisation de la tâche manuelle, quelle que soit le type d'instruction utilisée pour les exécuter.

Étant donné que le VRSQ partage 8 items sur 16 avec le *Simulator Sickness Questionnaire* (Kennedy et al., 1993), il est possible d'estimer si l'utilisation de l'AR pendant 30

minutes a conduit à des symptômes de cinétose. La RA n'est pas censée produire une cinétose car l'environnement réel est toujours perçu, il n'y a donc pas d'incohérence avec les indices visuels de mouvement. Tel qu'attendu, les scores obtenus avant et après l'utilisation de la RA n'ont pas révélé d'augmentation des nausées, des difficultés de concentration, de l'inconfort général et des vertiges. De plus, ces résultats sont congruents avec ceux d'une étude dans laquelle la RA n'a causé que des symptômes négligeables de *simulator sickness* (Vovk et al., 2018).

2.5.5 Conclusion

À notre connaissance, cette étude est la première à examiner, à l'aide de mesures optométriques et d'une échelle subjective, l'effet de la RA sur le système visuel. Les résultats des mesures objectives et subjectives suggèrent qu'il n'y a pas d'impact sur le système oculomoteur, c'est-à-dire pas changement dans les mesures optométriques et peu de symptômes de fatigue. Ainsi, une interface en RA, comme celle développée dans notre étude avec le Microsoft HoloLens 1, pourrait donc être utilisée pour guider les tâches d'assemblage manuel pendant 30 min sans être plus difficile pour le système oculomoteur que les instructions conventionnelles. Dans le contexte industriel d'elm.leblanc, nous pouvons conclure que ce cas spécifique d'utilisation avec la RA est sans danger pour le système visuel des opérateurs.

Bien que la présente étude ait utilisé un environnement expérimental qui tend à reproduire les conditions réelles d'utilisation de la RA, cet environnement n'est cependant pas strictement équivalent aux conditions réelles de travail industriel au sein d'elm.leblanc. Ainsi, ce travail ne constitue qu'une première étape pour évaluer les effets de la RA sur les opérateurs industriels. Des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les changements du système oculomoteur dans un environnement réaliste, par exemple, une utilisation répétitive, une période d'assemblage plus longue, des tâches plus complexes et des conditions d'éclairage industriel. Une étude de l'efficacité et de la charge mentale en RA, réalisée directement dans un contexte industriel sur les lignes de production d'elm.leblanc est présentée au chapitre 4.

2.6 Étude 2 - Effet de la RA sur la vision binoculaire chez une population à risque

2.6.1 Introduction

Dans l'étude précédente, nous avons montré que l'utilisation de la RA pendant 30 min ne semble pas avoir de conséquence sur la vision binoculaire d'utilisateurs ne présentant pas de troubles particuliers de la vision. Toutefois, dans le but d'apporter des conclusions applicables à l'ensemble de la population et à celle des opérateurs d'elm.leblanc, il est nécessaire d'évaluer les effets de la RA sur une plus large population.

Dans la littérature, on retrouve très peu d'études sur l'impact des nouvelles technologies réalisées auprès de populations présentant des troubles modérés de la vision binoculaire comme le strabisme, les hétérophories, etc... Selon les études, la prévalence du strabisme est comprise entre 0.99 % et 2.6 % (Friedman et al., 2009; Pathai et al., 2010). Une revue récente de la littérature indique par ailleurs une prévalence de 5 à 33 % pour les anomalies de la vergence (Cooper & Jamal, 2012). Il n'existe cependant aucune donnée épidémiologique concernant la prévalence des anomalies de la vision stéréoscopique.

Considérant que ces populations sont des utilisateurs potentiels des technologies stéréoscopiques telles que la RA, l'évaluation de l'impact auprès de ces populations spécifiques ne doit pas être négligée. En effet pour pouvoir correctement percevoir les stimuli 3D, la vision stéréoscopique est nécessaire ainsi qu'un mécanisme de fusion. Or comme le suggère Kim et al., (2013), certains patients présentant des troubles de la vision binoculaire (e.g., strabisme, anisométrie), ont une amplitude de fusion différente qui peut empêcher la fusion binoculaire, ou entraîner un effort supplémentaire pour réaliser cette fusion. Ces efforts peuvent alors être à l'origine d'une plus grande fatigue visuelle chez cette population lors de l'utilisation de dispositifs 3D.

Plusieurs études ont analysé quels facteurs oculaires (e.g., acuité visuelle faible, erreurs de réfraction, pression intraoculaire, présence de strabisme, stéréoacuité et anomalies rétinienne) pouvaient augmenter les risques d'asthénopie au cours de la visualisation de contenu 3D. Ces études montrent que la présence d'exophorie est un des facteurs principaux d'asthénopie (Kim et al., 2012, 2013). Dans une autre étude, ces auteurs observent que les personnes possédant une vision stéréoscopique déficiente présentent moins de symptômes après visualisation de contenu dans une TV3D, que les personnes sans trouble de la vision stéréoscopique (Kim et al., 2013).

Aucune étude n'ayant été réalisées avec des dispositifs de RA, les données actuellement disponibles dans la littérature ne nous permettent pas de savoir si l'utilisation de la RA présente plus de risque pour les individus avec des troubles modérés de la vision binoculaire. Dans l'objectif d'une utilisation inclusive, nous nous sommes donc intéressés aux effets de la RA sur la vision binoculaire auprès d'une population potentiellement à risque selon l'ANSES (e.g., anisométries, phories, strabismes). Dans cette étude, nous avons évalué l'impact de la RA auprès d'une population présentant des troubles modérés de la

vision binoculaire. Dans ce but, nous avons répliqué la méthodologie de notre première étude afin d'évaluer les effets de la RA sur la fatigue visuelle et l'inconfort visuel, avec des patients recrutés au CHRU de Brest.

2.6.2 Méthode

Participants

Dix patients (4 femmes, 6 hommes) ont été recrutés au sein du service d'ophtalmologie du CHRU de Brest entre juillet 2020 et janvier 2021. Les patients recrutés avaient de 19 à 44 ans ($M=28$; $ET=8.1$) et devaient présenter au moins un des critères d'inclusion suivants : hypermétropie supérieure à +5.00 D, strabisme, hétérophorie, vision stéréoscopique altérée ou absente, amblyopie. La Table 3 résume le profil de chaque patient recruté en fonction de leurs troubles visuels.

Table 3 - Résumé des troubles oculaires des 10 patients inclus dans l'étude.

Trouble visuel	Patients									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hypermétropie	×	×			×	×				×
Astigmatie		×				×				×
Myopie				×						
Disparité de fixation	×		×	×						
Hétérophorie							×	×	×	
Strabisme		×					×	×	×	×
Vision stéréoscopique altérée		×		×		×				
Vision stéréoscopique absente			×				×	×		
Anisométrie				×						

Matériel et procédure

Le matériel et la procédure utilisés pour cette étude sont les mêmes que ceux de l'étude 1 à l'exception de l'absence de l'utilisation de la condition contrôle (i.e., instructions papier). En effet, le recrutement au CHRU de Brest étant conditionné par la disponibilité de patients remplissant les critères d'inclusion, seule une unique session de test était réalisable. Par ailleurs, étant donné la population cible, les tests optométriques ont été réalisés par une orthoptiste du CHRU de Brest.

Ainsi au cours de l'étude, chaque patient devait réaliser une tâche d'assemblage avec des instructions en RA affichées dans l'HoloLens 1. Les mêmes mesures optométriques que dans l'étude 1 (voir paragraphe 2.5.2) et le VRQS ont été réalisées par une orthoptiste pendant 15 minutes, avant et après la tâche d'assemblage.

2.6.3 Résultats

Les analyses statistiques ont été effectuées avec JASP (JASP Team, 2019). Afin d'examiner si l'utilisation de la RA entraîne des changements dans la vision binoculaire, un *t* de student pour échantillon apparié, a été calculé pour chaque paramètre, avec le facteur session de test (avant, après).

Mesures optométriques

La Table 4 présente les moyennes et écarts-types de chaque test optométriques, en fonction de la session de test, i.e., avant et après la tâche d'assemblage. Les analyses réalisées sur les tests optométriques n'ont montré aucune différence significative pour l'ensemble des tests (tous les $p > 0.13$).

Table 4 - Moyennes et écarts-types des tests optométriques, avant et après la tâche d'assemblage.

Paramètres optométriques	Session de test	
	Avant M (SD)	Après M (SD)
Acuité visuelle de loin (x/10th)	9.30 (1.06)	9.30 (1.38)
Acuité visuelle de près (x/10th)	10.00(0.00)	10.00(0.00)
Acuité stéréoscopique (arc sec)	203.33(293.23)	216.66 (291.04)
Phorie vertical de loin (D)	9.10 (14.85)	8.90 (14.46)
Phorie vertical de près (D)	7.60 (18.35)	4.80 (22.20)
Amplitude de fusion		
Divergence de loin (D)	6.00 (4.76)	9.14 (13.80)
Convergence de loin (D)	18.43 (11.66)	12.85 (6.41)
Divergence de près (D)	8.28 (4.53)	11.71 (13.14)
Convergence de près (D)	24.71 (13.12)	17.85 (10.86)
Amplitude d'accommodation (cm)	13.04 (4.97)	13.91 (5.08)
Convergence accommodative (AM/D)	5.75 (2.69)	4.88 (4.65)

Questionnaire subjectif

La Table 5 présente les moyennes et écarts-types pour chaque symptôme du VRSQ, en fonction de la session de test.

Un effet principal de la session de test est observé pour le symptôme de mal de tête, $t_{1,9} = -3.087$, $p = 0.013$, $d = -0.976$. Les participants ont rapporté des scores plus élevés de mal de tête après l'assemblage réalisé en RA qu'avant. Un effet principal est également observé pour le symptôme de fatigue visuelle, $t_{1,9} = -4.811$, $p < 0.001$, $d = -1.521$. Les scores de fatigue visuelle sont plus élevés après utilisation de la RA qu'avant.

Afin de tenir compte des profils différents des patients inclus dans cette étude (absence ou présence de strabisme ; absence ou présence de vision stéréoscopique), des analyses exploratoires supplémentaires ont été réalisées avec ces deux facteurs. Aucun effet significatif du facteur prenant en compte la présence d'un strabisme ou non n'a été observé.

De même, aucun effet significatif du facteur prenant en compte la présence ou l'absence de vision stéréoscopique n'a été observé.

Table 5 - Moyennes et écart-type pour chaque symptôme du Virtual Reality Symptoms Questionnaire, avant et après la tâche d'assemblage.

Symptômes	Session de test	
	Avant M (SD)	Après M (SD)
Inconfort général	0.80 (1.23)	1.60 (1.51)
Fatigue	1.40 (1.17)	1.90 (1.50)
Ennui	0.30 (0.68)	0.00 (0.00)
Somnolence	0.10 (0.32)	0.20 (0.42)
Mal de tête	0.60 (1.27)	1.80 (1.69) *
Vertiges	0.30 (0.67)	0.50 (1.58)
Difficulté de concentration	0.60 (1.26)	1.00 (1.70)
Nausée	0.00 (0.00)	0.60 (1.58)
Yeux irrités	0.40 (0.70)	1.40 (1.77)
Fatigue visuelle	1.00 (1.49)	2.20 (1.39) ***
Vision floue	0.60 (1.58)	0.80 (1.55)
Difficulté à focaliser	0.70 (1.89)	0.70 (1.89)

Les astérisques font référence à une différence significative entre la session avant et après. * significatif à 0.05; ** significatif à 0.01; *** significatif à 0.001

2.6.4 Discussion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer si l'utilisation de la RA comme support de réalisation d'une tâche d'assemblage pouvait avoir des effets négatifs sur le système visuel de patients ayant des troubles modérés de la vision binoculaire. Cette étude avait également pour but d'obtenir des données représentatives de certains opérateurs d'elm.le-blanc qui tout comme dans la population générale peuvent présenter des troubles légers de la vision binoculaire. Nous avons donc réalisé une réplification de l'étude 1, associant des mesures optométriques objectives (9 mesures) et des mesures subjectives (scores au VRQS).

Concernant les tests optométriques, aucune différence statistiquement significative n'a été constatée après l'utilisation de la RA. L'amélioration des scores d'acuité stéréoscopique après utilisation de la RA observée dans l'étude 1 n'a donc pas été retrouvée auprès de la population de patient testée. En effet, bien que cela ne soit pas significatif, l'acuité stéréoscopique est légèrement dégradée après l'utilisation de la RA qu'avant. Ceci peut être expliqué par le nombre réduit de patient, ne permettant pas une puissance statistique suffisante pour observer des effets significatifs. Par ailleurs, le fait que les patients de cette étude aient une vision stéréoscopique altérée et donc des faibles scores d'acuité stéréoscopique peut également expliquer ces résultats.

L'effet de la session de test sur l'amplitude de fusion en convergence observé dans l'étude 1 n'est également pas retrouvé dans cette étude. Il semble ainsi que la session « avant » n'ait pas eu un effet d'entraînement améliorant l'amplitude de fusion en convergence de loin au cours de la session « après », au contraire une dégradation (non significative) est retrouvée. Ainsi, aucune dégradation significative du système oculomoteur après visualisation de contenu en RA n'a été observée après 30 minutes d'utilisation. Ces résultats sont donc en accord avec les résultats de notre Etude 1, ainsi qu'avec celle d'Hirota et al., (2019) et Peli (1998).

De façon similaire à l'étude 1, l'évaluation des symptômes subjectifs de fatigue par le VRSQ, montre des scores différents entre les sessions avant et après. En effet, la réalisation de l'assemblage avec les instructions en RA, a conduit à une augmentation significative des symptômes de maux de tête et de fatigue visuelle. Ceci confirme qu'une plainte subjective d'inconfort visuel peut être associée à l'utilisation de la RA pendant 30 min. Ceci confirme également la disparité qui peut être observée dans les données objectives et subjectives et mais aussi la pertinence d'utiliser les deux afin d'obtenir des données complémentaires sur les effets de la RA sur ses utilisateurs.

Lorsque l'on compare la plainte subjective de l'inconfort visuel observée dans cette étude auprès de patients à celle observée dans l'étude 1, on observe des différences qualitatives et quantitatives. En effet, la différence des scores pour les symptômes subjectifs rapportés par les participants entre la session avant et après utilisation de la RA étaient : maux de tête (+0.66); yeux irrités (+0.61); vision floue (+0.35), pour l'étude 1, et maux de tête (+1.20); fatigue visuelle (+1.20) pour la présente étude. Ainsi, la plainte des patients ayant des troubles légers de la vision binoculaire, ne porte pas exactement sur les mêmes dimensions et est descriptivement deux fois plus importante que celle des participants n'ayant pas de troubles. Compte tenu des troubles que présentent les patients testés (e.g., strabisme, vision stéréoscopique altérée), cette plainte subjectivement plus importante peut s'expliquer par une amplitude de fusion différente chez ces patients, entraînant un effort supplémentaire et donc une plus grande fatigue visuelle (Kim et al., 2013). Cependant, notons que les scores rapportés par les patients, bien que plus importants, restent faibles et toujours dans la catégorie des symptômes « légers ».

2.6.5 Conclusion

À notre connaissance, cette étude est la première à évaluer, à l'aide de mesures optométriques et d'une échelle subjective, l'effet de la RA sur le système visuel de patient atteint de troubles modérés de la vision binoculaire. Les résultats des mesures objectives suggèrent qu'il n'y aurait pas d'impact de la RA lorsque le système oculomoteur de l'utilisateur présente une altération légère. L'utilisation du VRSQ montre que les patients présentent une plainte subjective qualitative et quantitative différente, suggérant une plainte subjective plus importante, mais toujours légère. Dans le contexte industriel d'elm.leblanc, nous pouvons conclure que ce cas spécifique d'utilisation avec la RA ne présente pas plus de danger pour le système visuel des opérateurs qui présenteraient des

troubles modérés de la vision binoculaire. Toutefois, l'augmentation des scores de symptômes subjectifs observée, conduit à intégrer la RA avec prudence au sein de cette population. Par ailleurs, compte tenu du faible nombre de patients inclus dans cette étude, l'étude des impacts de la RA auprès de patients présentant des troubles de la vision binoculaire doit se poursuivre, notamment pour ceux ayant des troubles modérés voire sévères.

2.7 Conclusion générale

Le fonctionnement inhérent aux dispositifs de RA, impose sur le système visuel une demande oculomotrice particulière (e.g., conflit accommodation vergence, rivalité focale) qui peut être à l'origine de fatigue visuelle et d'inconfort visuel. Ce chapitre présente donc deux études consacrées à l'évaluation des risques associés à l'utilisation de la RA que sont la fatigue visuelle et l'inconfort visuel.

L'objectif de ces deux études était double : scientifique et industriel. D'un point de vue scientifique, l'objectif était d'étudier l'impact de la RA en utilisant une méthodologie qui n'avait pas encore été appliquée à l'étude de la RA, en associant des mesures optométriques objectives classiquement utilisées dans l'étude de la vision binoculaire et une mesure subjective des symptômes associés. D'un point de vue industriel, l'objectif était d'évaluer les risques sanitaires liés à l'utilisation de la RA et de déterminer dans quelle mesure il était possible que tous les opérateurs puissent utiliser le Microsoft HoloLens 1 sans que cela ne porte atteinte à leurs performances et confort visuel.

Nous avons testé une interface en RA développée pour le Microsoft HoloLens 1 permettant de réaliser une tâche d'assemblage afin d'évaluer si, les instructions en RA ne présentaient pas plus de risque que des instructions papier (Étude 1). Puis nous avons testé si cette interface était également sans risque pour une population présentant des troubles modérés de la vision binoculaire (Étude 2). L'étude 1, réalisée auprès d'une population sans trouble de la vision binoculaire, n'a pas montré de changement dans les mesures optométriques et peu de symptômes de fatigue suite à l'utilisation de la RA pendant 30 min. L'utilisation de la RA ne semble donc pas plus difficile, ni à risque, pour le système oculomoteur que les instructions conventionnelles. Dans l'étude 2, nous observons une faible plainte subjective d'inconfort visuel sans aucun signe objectif de fatigue visuelle chez les patients ayant des troubles modérés de la vision binoculaire, indiquant que l'utilisation de la RA ne présente pas nécessairement plus de risque auprès de cette population. Ces deux études mettent également en avant la dissociation existante entre les données objectives et les plaintes subjectives, appuyant ainsi la pertinence d'utiliser les deux mesures de façon à obtenir des données complémentaires sur la fatigue visuelle et l'inconfort visuel associés à l'utilisation de la RA.

En conclusion, ces deux études réalisées dans le contexte de la demande industrielle d'elm.leblanc, avaient pour but d'évaluer s'il existe un cas d'utilisation de la RA sans risque pour le système oculomoteur des opérateurs de production, qu'ils présentent des troubles de la vision binoculaire ou non. Ces études ont donc permis de tester les impacts

de l'utilisation sur une courte durée d'une interface en RA en 2D dans laquelle nous avons minimisé les risques oculomoteurs tels que le conflit accommodation vergence. Or dans le cadre d'autres cas d'utilisations industrielles, en plus d'information 2D (texte, image), il peut être fait usage d'information 3D (présentation de modèles 3D des composants), ou bien d'une combinaison des deux. Selon les scénarios envisagés, les informations en RA peuvent engendrer un fort conflit accommodation vergence, ou encore une rivalité focale, qui n'ont pas été évaluées dans nos études. De futures études pourraient alors évaluer l'impact de la RA sur la fatigue et l'inconfort visuel en utilisant des scénarios de RA plus perturbateurs et contraignants pour le système oculomoteur et pour des durées d'utilisation plus longues.

Par ailleurs, au-delà des risques purement oculomoteur, l'utilisation de la RA pourrait présenter des risques cognitifs pour l'utilisateur. En effet, le champ de vision réduit en RA, l'ajout d'informations virtuelles dans un environnement parfois déjà chargé, pourrait impacter l'attention visuelle des utilisateurs. Dans le chapitre suivant, nous présenterons ainsi deux études évaluant les risques cognitifs liés à l'utilisation de la RA, notamment sur l'attention visuelle.

IMPACT DE LA RÉALITÉ AUGMENTÉE SUR L'ATTENTION VISUELLE

3.1 Le système visuel

Après avoir étudié les impacts sur le système oculomoteur, nous allons nous intéresser aux impacts sur le système cognitif et plus particulièrement à la modalité visuelle. Afin de comprendre la façon dont les mécanismes cognitifs tels que l'attention visuelle, peuvent être impactés par la RA, il convient de présenter le fonctionnement de l'ensemble du système visuel : son anatomie et le traitement des informations visuelles par le cerveau humain.

3.1.1 La rétine et les photorécepteurs

La rétine est une fine membrane qui tapisse le fond du globe oculaire. Son rôle principal est la phototransduction, c'est-à-dire, de convertir le signal lumineux en un signal nerveux afin de le transmettre au nerf optique, voie par laquelle les informations visuelles atteignent le cerveau pour y être interprétées.

La phototransduction est assurée par les photorécepteurs, il en existe deux types : les cônes et les bâtonnets, qui présentent des propriétés différentes. La vision dite photopique, c'est-à-dire une vision de jour, en couleur avec une acuité optimale, repose principalement sur les cônes. Tandis que la vision scotopique, qui est une vision en basse lumière, en noir et blanc, de faible acuité, repose uniquement sur les bâtonnets. Il existe un niveau d'éclairément qui se situe entre photopique et scotopique, cette plage intermédiaire est la vision dite mésopique dans laquelle les bâtonnets et les cônes sont tous deux actifs.

La rétine humaine contient 4.6 millions de cônes et 92 millions de bâtonnets (Curcio et al., 1990). La répartition de ces photorécepteurs à la surface de la rétine n'est pas homogène. Il existe différentes régions identifiables tout au long de la surface de la rétine (voir Figure 26). En effet la plus grande densité de cônes se trouve au niveau de la fovéa (190 000 cônes/mm²), zone qui offre la meilleure acuité. Au-delà de la fovéa les bâtonnets apparaissent de manière progressive et leur densité devient égale à celle des cônes à une distance de 400 à 500 microns du centre de la fovéa.

Figure 26 - Photographie d'une coupe du fond de la rétine <http://kezako.unisciel.fr/> (dernière consultation 06/08/2020). *Photo retirée afin de respecter les droits d'auteur.*

Au niveau de la macula, la région centrale de la rétine ne comportant pas de vaisseau sanguin, l'acuité visuelle est maximale. Enfin, la papille optique (ou encore point aveugle) est le lieu de convergence des vaisseaux sanguins et d'insertion du nerf optique, elle est dépourvue de photorécepteur, c'est une zone aveugle.

La rétine est composée de six types de cellules neuronales : les cellules horizontales, bipolaires, amacrines, ganglionnaires et des deux types de photorécepteurs (voir Figure 27). Ce sont ces différentes cellules qui vont permettre au signal lumineux d'être converti en signal électrique transmis au reste du système visuel. Pour une description détaillée de la physiologie de la phototransduction, voir Salesse (2017).

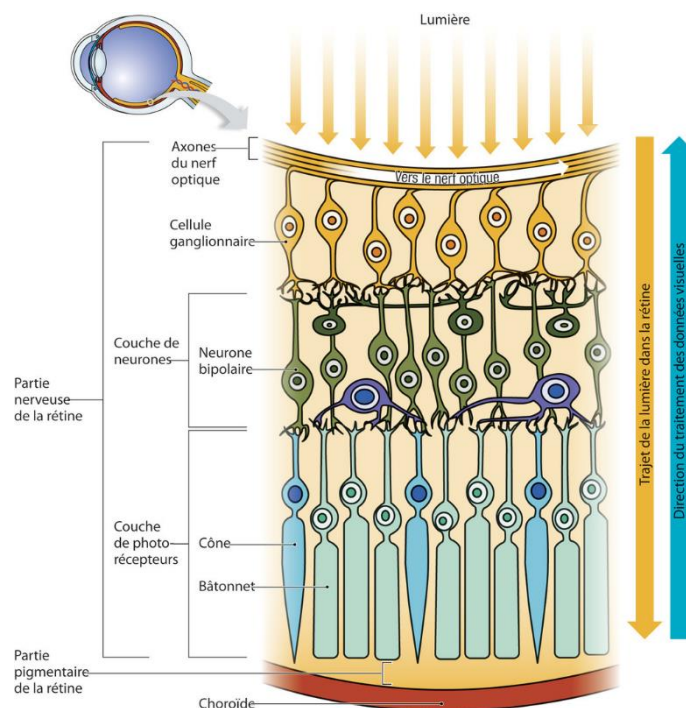


Figure 27 - Schéma de la structure cellulaire de la rétine, indiquant le trajet de la lumière et du traitement des informations visuelles, © (Léger, 2014)

3.1.2 Les voies visuelles et aires cérébrales

Les axones des cellules ganglionnaires de la rétine se rejoignent pour former le nerf optique. Après le chiasma optique (lieu de croisement d'une partie des fibres) les fibres peuvent emprunter plusieurs voies et atteindre différentes cibles (le prétectum, le colliculus supérieur, l'hypothalamus, le cortex strié). Il existe ainsi quatre voies visuelles différentes (voir Figure 28), la voie rétino-corticale (ou voie géniculostriée) est la voie principale du traitement de l'information visuelle et de la perception visuelle consciente. Cette voie passe par le corps genouillé latéral, les radiations optiques et se termine au niveau du cortex visuel primaire.

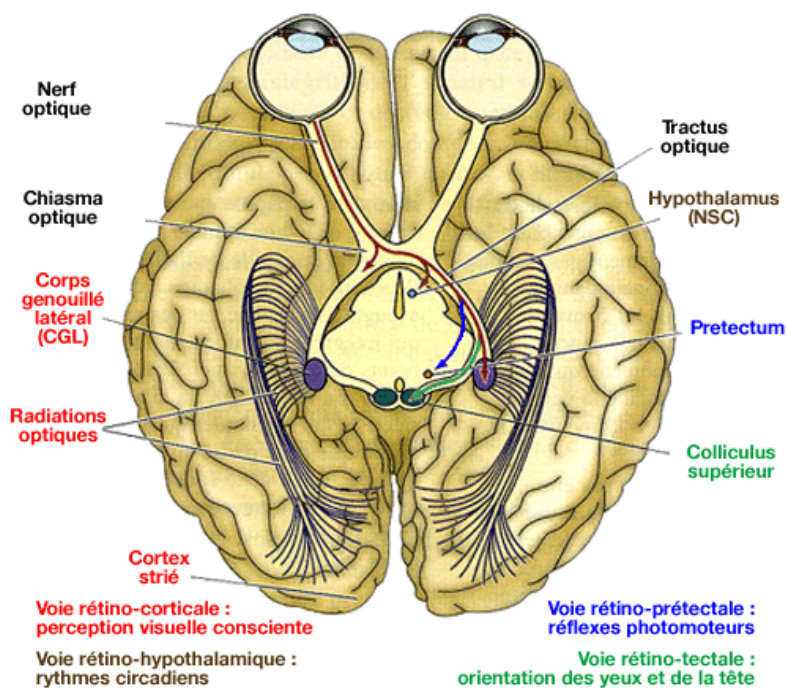


Figure 28 - Schéma de l'organisation fonctionnelle des différentes voies visuelles. (Purves et al., 2019).

La majorité des fibres provenant du corps genouillé latéral se projette sur le cortex visuel primaire (aussi appelé V1, cortex strié, aire 17 de Brodmann). Le cortex visuel primaire est latéralisé, ainsi chaque hémisphère reçoit l'information en provenance du champ visuel controlatéral. Son organisation est dite rétinotopique, c'est-à-dire que chaque zone de la rétine correspond à une zone précise du cortex visuel primaire. Le cortex visuel primaire opère le premier niveau du traitement de l'information visuelle, qui est ensuite réalisé par deux voies visuelles distinctes (voir Figure 29) : la voie ventrale du « où » et la voie dorsale du « quoi » (Goodale & Milner, 1992).

La voie ventrale du « quoi » prend son origine au niveau de V1 et se projette au niveau du lobe temporal inférieur via V2 et V4. Cette voie permet l'identification et la reconnaissance consciente des objets, elle est responsable du traitement des informations des propriétés des objets (e.g., couleur, forme).

Figure 29 - Aires visuelles et voies ventrale et dorsale. <http://vignan.srikanthan.free.fr/> (dernière consultation 18/03/2021). *Photo retirée afin de respecter les droits d'auteur.*

La voie dorsale du « où », prend son origine au niveau de V1 et se projette au niveau du lobe pariétal supérieur via V2, V3 et V5. Elle assure une analyse visuo-spatiale, permettant la planification des mouvements adaptés.

V1 et V2 sont impliquées dans le traitement des caractéristiques visuelles primaires, telles que la couleur et la forme. V3 et V5 sont responsables de la détection des mouvements et la localisation spatiale. V4 est spécialisée pour le traitement de la couleur et l'orientation (voir Vignal-Clermont & Milea (2016) pour une description de l'anatomie fonctionnelle des voies visuelles).

3.2 L'attention visuelle

Le système de traitement de l'information à des capacités limitées, il n'est donc pas possible pour le système de traiter toutes les informations provenant de l'environnement extérieur. Le fait que la RA ait pour but d'ajouter des informations visuelles supplémentaires, soulève la question de l'impact de la RA sur l'attention visuelle.

L'utilisation récente du jeu Pokémon GO en est un exemple. Bien que ce jeu de RA sur smartphone, laisse l'environnement réel complètement visible par les utilisateurs, ces derniers n'y prêtent plus attention lorsqu'ils y jouent. De nombreux accidents de voiture, de vélo ou de marche ont ainsi été provoqués par l'utilisation de Pokémon GO (Wagner-Greene et al., 2017). Du point de vue appliqué en milieu industriel, cette problématique fait émerger la question de la sécurité des opérateurs. L'allocation des ressources attentionnelles de l'opérateur est-elle différente lors du traitement simultané d'informations virtuelles (e.g., instructions) et réelles (e.g., alerte, danger) ? Lorsque l'opérateur porte son attention sur un objet virtuel dans le casque de RA, dans quelle mesure celui-ci peut répondre à un stimulus du monde réel ? Est-il susceptible de moins rapidement détecter une alerte ou un danger imminent ?

3.2.1 Définition de l'attention

L'attention peut être définie comme un processus intégré au système du traitement de l'information, dont la fonction est de garantir une adaptation du comportement à l'environnement (Broadbent, 1958). Il n'est pas possible pour le système de traiter toutes les informations provenant de l'environnement extérieur. Selon Lemerrier et Cellier (2008), l'attention est à la fois ce qui contrôle le traitement de l'information, par une sélection des informations pertinentes et une inhibition des informations non pertinentes, mais est également la ressource qui permet de traitement de ces informations.

De très nombreuses définitions de l'attention ont été proposées dans la littérature et il ressort qu'il est difficile d'en donner une définition unique. Selon van Zomeren & Brouwer (1994), l'attention ne peut être réduite à une seule définition, et n'est pas liée à une seule structure anatomique ou évaluée par un test unique. L'attention est une fonction centrale

qui peut donc être considérée comme un ensemble de processus attentionnels qui permettent à l'humain d'orienter son attention, de sélectionner les informations et de diviser ses ressources nécessaires à la réalisation d'activités cognitives.

Classiquement on distingue deux composantes principales dans les processus attentionnels : la sélectivité et l'intensité. L'intensité fait référence au niveau de vigilance ou d'alerte d'un individu ainsi qu'à l'attention soutenue, correspondant à la capacité de maintenir un niveau suffisamment élevé d'attention durant une période de temps prolongée. La sélectivité fait référence à la capacité à sélectionner un élément spécifique de notre environnement afin de le traiter de manière préférentielle.

L'attention sélective permet de sélectionner des informations pertinentes, en traitant une source d'information spécifique et ainsi permet d'ignorer les informations non pertinentes. Les nombreuses théories proposées afin de modéliser l'attention sélective postulent toutes l'existence d'un filtre attentionnel qui permettrait d'éviter la surcharge. Néanmoins, la position de ce filtre attentionnel diverge et fait débat : sélection pré-attentionnelle (Broadbent, 1958; Treisman, 1969), ou sélection tardive (Deutsch & Deutsch, 1963; Norman, 1968).

L'attention divisée est celle qui permet un partage des ressources attentionnelles et donc la réalisation de différentes tâches de manière simultanée. Les modèles proposés sur l'attention divisée diffèrent par leur conceptualisation des réserves attentionnelles, i.e., l'existence d'un réservoir unique dont les ressources peuvent être allouées en plus ou moins grande quantité à différentes tâches (Kahneman, 1973) ou l'existence de réservoirs attentionnels multiples (Wickens, 1991).

Etant donné que notre cas d'utilisation de la RA repose sur des interactions utilisant majoritairement la modalité visuelle, dans les prochains paragraphes nous nous intéresserons uniquement à la dimension visuo-spatiale de l'attention sélective.

3.2.2 L'attention visuo-spatiale

De très nombreuses études ont été menées afin de déterminer la façon dont l'attention visuelle s'oriente dans l'espace. Les travaux de Posner suggèrent que l'orientation visuo-spatiale de l'attention peut être décomposée en trois opérations : désengagement de l'attention de sa localisation actuelle, le déplacement de l'attention vers la nouvelle localisation et l'engagement de l'attention à cette localisation (Posner & Petersen, 1990; Rafal & Posner, 1987). L'attention visuo-spatiale peut être caractérisée selon plusieurs dissociations concernant : la manière dont elle s'exprime, sa source ou encore son mode de sélection.

Implicite/Explicite (*Covert/Overt*)

La dissociation entre l'attention implicite et explicite, fait référence à la manière dont s'exprime l'orientation de l'attention. L'orientation de l'attention peut être explicite

(*overt*) ou implicite (*covert*) (Posner, 1980). Lorsque le déplacement de l'attention implique des mouvements des yeux ou de la tête, elle est dite explicite. Néanmoins, il est possible pour un individu de prêter attention à des informations qui ne soient pas situées au niveau fovéal et de déplacer leur attention vers un objet situé en périphérie sans bouger les yeux. Posner (1980) qualifie ce déplacement de l'attention en l'absence de mouvements oculaires (ou de la tête) manifestes, d'orientation implicite. Le paradigme d'indigage spatial (Posner & Cohen, 1984; Posner et al., 1980; Posner, 1980) a été développé afin de tester l'orientation visuo-spatial de l'attention en l'absence de mouvement explicite (voir paragraphe 3.5.1 pour une description détaillée).

Endogène/Exogène (*Exogeneous/Endogeneous*)

Cette distinction fait référence au fait qu'il existe deux manières d'allouer spatialement son attention (James, 1890). La classification endogène et exogène met en lumière la source de l'attention (voir Carrasco (2011) pour une revue). Dans le cas d'une attention dite endogène, c'est l'individu lui-même qui dirige volontairement son attention vers une information du monde extérieur. C'est donc une attention déployée de manière active vers un endroit particulier de l'espace. Lorsque l'attention est dite exogène, elle n'est pas déployée de manière volontaire par l'individu, mais de façon passive, involontaire et automatique. L'attention exogène est également appelée attention réflexive, car elle est déclenchée de manière réflexive vers un stimulus qui apparaît de manière soudaine.

Ascendant/Descendant (*Bottom-up /Top-down*)

La description de la classification endogène/exogène, nécessite de présenter la distinction entre les processus bottom-up (ascendant) et top-down (descendant) (Connor et al., 2004; Itti, 2000; Pinto et al., 2013; Treisman & Gelade, 1980). Les processus top-down sont dirigés par les attentes, connaissances et buts préalables d'un individu par rapport à son environnement. Ils sont à l'œuvre dans l'attention endogène, lorsque l'individu a des connaissances sur son environnement et donc des attentes sur l'endroit où pourrait se produire un événement d'intérêt. Les processus bottom-up renvoient à des traitements dirigés par les données, i.e., entrées sensorielles et saillance de la scène. Ils sont généralement à l'œuvre dans l'attention exogène, lorsque l'individu n'a pas de connaissance préalable sur la scène visuelle.

Basée sur l'objet/ Basée sur l'espace (*Object-based/ Space-based*)

Il a été mis en évidence deux modes de sélection de l'attention visuelle, un basé sur l'espace et l'autre sur les objets. Dans l'attention basée sur l'espace, les stimuli sont sélectionnés en fonction de leur emplacement dans le champ visuel de l'individu (Ericksen et Hoffman, 1973 ; Posner, 1980). Pour l'attention basée sur l'espace, la sélection porte sur un objet ou un groupe d'objet (Duncan, 1984). Ainsi, l'attention visuelle est dirigée vers des blocs d'informations visuelles organisés correspondant à un objet ou à une forme

cohérente, et ceci même si les objets se chevauchent dans l'espace ou sont spatialement discontinus.

3.2.3 Problématiques attentionnelles en RA

Comme suggéré au début de ce chapitre, la question de l'impact de la RA sur l'attention est centrale pour la sécurité des utilisateurs. Nous allons dans les prochains paragraphes, présenter quelques-unes des problématiques attentionnelles qui peuvent être observées lors de l'utilisation de la RA ayant fait l'objet d'études au sein de la littérature.

Lors de l'utilisation de la RA, l'environnement réel reste visible, ce qui implique que l'utilisateur doit simultanément percevoir, comprendre et assimiler les informations visuelles à la fois dans le monde virtuel et le monde réel, alors que ces informations peuvent être présentées à différents endroits (par exemple, près ou loin de l'utilisateur, voir Figure 30). Ainsi, la RA oblige l'utilisateur à porter son attention de manière répétée entre différents types d'environnements (réels/virtuels) et de distances pour extraire des informations. Cette augmentation d'informations de différents types et à différentes distances, propre à la RA, pourrait être à l'origine d'une demande attentionnelle particulière pour l'utilisateur.

Figure 30 - L'utilisation de Microsoft guides 365 implique de porter son attention de la structure d'assemblage (à l'avant), vers l'interface des instructions (au milieu), puis vers les bacs contenant les pièces à saisir (à l'arrière). <https://dynamics.microsoft.com/fr-fr/mixed-reality/guides/> (dernière consultation 18/05/2021). *Photo retirée afin de respecter les droits d'auteur.*

De nombreuses études ont ainsi été menées afin d'évaluer l'impact de la RA sur l'attention et différentes problématiques attentionnelles ont ainsi été identifiées et examinées, telles que la distraction cognitive, la cécité attentionnelle ou encore le *cognitive tunnelling*.

La distraction cognitive, i.e., une « mauvaise » allocation de l'attention (Smiley, 2005), a été étudiée chez les conducteurs utilisant la RA par HUD. Kim et Gabbard (2019), ont observé dans une étude sur la conduite, que la RA par HUD avait un impact sur l'allocation de l'attention visuelle des participants, car elle peut améliorer la perception des éléments augmentés par le HUD (e.g., piétons), mais peut également distraire visuellement et cognitivement des autres éléments non augmentés (e.g., éléments de la route). Ce phénomène de distraction cognitive peut suggérer un traitement attentionnel supplémentaire associé aux éléments en RA.

Un autre phénomène attentionnel a également été observé en RA. Il s'agit de la cécité attentionnelle, qui désigne le fait qu'un individu lorsqu'il est concentré sur une tâche ne détecte pas des événements ou des objets très remarquables qui apparaissent dans son champ visuel (Simons & Chabris, 1999). Cette cécité attentionnelle est un phénomène normal qui se produit pour les scènes de la vie de tous les jours. Cependant, il semble être augmenté lors de l'utilisation de la RA et ainsi entraîne une réduction de la détection d'évènements inattendus (Dixon et al., 2013, 2014). Le fait que cette cécité attentionnelle soit augmentée en RA, vient également suggérer qu'il y aurait un traitement attentionnel additionnel des informations en RA au détriment d'autres informations.

Un élément supplémentaire allant dans ce sens est le *cognitive tunneling* ou *attentional tunneling*, un phénomène attentionnel top-down qui se traduit par une fixation involontaire des ressources cognitives sur un seul groupe d'information, affectant la capacité du système visuel à détecter et à réagir rapidement aux événements en dehors de ce groupe (Martens & van Winsum, 2000; Thomas & Wickens, 2001; Wickens, 2005; Yeh et al., 1999). De nombreuses études sur l'attentional tunneling en RA par HUD, montrent que les utilisateurs qui effectuent une tâche en RA, manquent et présentent des temps de réaction plus longs aux événements inattendus qui ne sont pas présentés en RA (McCann et al., 1993; McCann & Foyle, 1994; Thomas & Wickens, 2001; Wickens & Alexander, 2009; Wolffsohn et al., 1998; Yeh et al., 1998).

Syiem et al., (2021) suggèrent que les études qui traitent de l'attentional tunneling en RA confondent souvent la présence du contenu virtuel en RA avec le fait de devoir réaliser une tâche supplémentaire sur le contenu en RA. Or, la prise en compte de cette tâche supplémentaire est nécessaire étant donné que les utilisateurs ont tendance à manquer des événements (cécité attentionnelle) lorsqu'ils sont engagés dans une tâche (Simons & Chabris, 1999). Notons que Syiem et al., (2021) ont ainsi observé que la présentation d'un contenu virtuel n'augmentait pas systématiquement le temps de réaction des utilisateurs aux événements, mais seulement lorsqu'une tâche était réalisée sur ce contenu virtuel. Cependant, les différents cas d'utilisation de la RA reposent sur une interaction entre l'utilisateur et le contenu en RA et non pas simplement une visualisation sans action, cette problématique attentionnelle associée à l'utilisation de la RA est donc centrale.

Ces différents résultats issus de la littérature laissent ainsi penser que l'ajout de contenus virtuels en RA a un impact sur l'allocation des ressources attentionnelles des utilisateurs. Cette modification de l'allocation de l'attention observée en RA peut-être expliquée par les capacités de traitement limitées du système cognitif ne permettant pas de traiter en même temps des informations issues de différents groupes perceptifs (Duncan, 1984; Treisman et al., 1983; Treisman, 1982). Lorsque des éléments présentent des attributs physiques semblables, tels qu'un mouvement cohérent, une couleur ou texture commune, ils sont regroupés perceptivement. Les éléments au sein d'un groupe perceptif peuvent être traités en parallèle (i.e., simultanément), tandis que les éléments entre différents groupes perceptuels sont traités en série (i.e., les uns après les autres). Si des éléments n'appartiennent pas au même groupe perceptif, le traitement sériel nécessitera un déplacement de l'attention, ce qui entraîne des temps de traitement plus importants pour les informations entre groupes que pour les informations au sein d'un groupe.

En se basant sur ces données et le fait que l'utilisation de la RA semble modifier l'allocation des ressources attentionnelles, il est possible que les informations en RA et celles du monde réel appartiennent à deux groupes perceptifs différents. La question de la différence d'allocation des ressources attentionnelles entre les informations en RA et dans le monde réel a été adressée en premier par des travaux sur les HUD. De nombreuses études ont alors montré que les informations dans un HUD et celles du monde réel font partie de deux groupes perceptifs différents (pour une revue, voir Crawford & Neal (2006)) qui ne peuvent donc pas être traités en parallèle. Le passage de l'un à l'autre serait ainsi associé à un coût attentionnel et à des temps de réaction plus longs (Becklen, 1983; McCann et al., 1993; Neisser & Becklen, 1975; Wickens & Long, 1994). Les éléments entraînant une ségrégation perceptive entre la symbologie des HUD et les informations du monde réel, ont été identifiés et correspondent principalement à la couleur, aux indices de mouvement et à la perspective (Foyle et al., 1991).

Bien que de nombreuses études aient été menées avec des HUD, ces résultats ne peuvent pas être directement généralisés aux récents casques de RA transparents. En effet, en plus d'être basée sur des technologies optiques différentes, la symbologie verticale monochromatique utilisée dans les HUD diffère grandement des éléments virtuels affichés dans les casques transparents actuels, due à l'amélioration des capacités informatiques de calcul et des systèmes d'affichage.

3.3 Problématique

L'étude de différentes problématiques attentionnelles identifiées dans la littérature a permis de mettre en avant des questions sous-jacentes communes : le traitement cognitif des informations virtuelles en RA est-il différent des informations du monde réel ? Y a-t-il un coût attentionnel supplémentaire associé aux traitements simultanés d'informations virtuelles et réelles ?

Cependant, les données de la littérature ne nous permettent pas de répondre à ces questions et ainsi de déterminer dans quelle mesure les informations virtuelles présentées

dans les casques transparents et celles du monde réel sont traitées comme deux groupes perceptifs distincts et donc si le passage entre les deux implique un coût attentionnel. Or si le traitement des informations virtuelles nécessite un coût cognitif et attentionnel supplémentaire, cela pourrait avoir des conséquences sur les performances visuelles des utilisateurs, mais également sur leurs capacités à détecter des informations et à y répondre rapidement. Évaluer la manière dont les processus attentionnels pourraient être modifiés lors de l'utilisation de la RA est donc central pour assurer la sécurité des futurs utilisateurs.

Afin de répondre à cette problématique, nous présenterons dans les prochains paragraphes deux études ayant pour but d'évaluer l'allocation de l'attention lors du traitement simultané d'informations réelles et virtuelles. L'impact de la RA sur l'attention sera évalué avec, une étude portant sur l'évaluation de l'attention divisée et la détection d'événements inattendus en utilisant le paradigme de double tâche et de recherche visuelle (Étude 3) et une autre étude sur l'attention sélective et l'orientation visuo-spatiale en utilisant le paradigme d'indication spatiale (Étude 4).

3.4 Étude 3 - Impact du context et distance switching en RA sur l'attention visuelle

Cette étude a été acceptée pour une présentation poster lors de la conférence IEEE VR 2021 et publiée dans les actes IEEE 2021 Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW) (Drouot, Le Bigot, De Bougrenet, et al., 2021).

3.4.1 Introduction

Parmi les différentes problématiques attentionnelles soulevées par l'utilisation de la RA, l'impact du context et distance switching a fait l'objet de peu d'études jusqu'à présent. Le context et distance switching correspondent au fait que l'utilisation de la RA force l'utilisateur à porter son attention de manière répétée entre différents types d'environnements (réels/virtuels) et de distances pour extraire des informations. Comme présenté précédemment, les problématiques attentionnelles ont davantage été étudiées avec des dispositifs de RA de type HUD. À notre connaissance, seules trois études ont évalué le context et distance switching en utilisant un casque récent de RA.

Gabbard et al., (2019) ont étudié l'effet du context et focal distance switching avec un HMD monoculaire sur les performances à une tâche de recherche visuelle (i.e., temps de réaction et précision) et sur la fatigue oculaire (item unique en 7 points). Les résultats ont montré un effet du context switching sur les temps de réaction et la précision à la tâche uniquement pour une distance éloignée (i.e., 6 m), mais pas pour les distances proches et moyennes (i.e., 0,7 m et 2 m). Les auteurs ont proposé que la diminution des performances visuelles puisse être expliquée par une mauvaise lisibilité du texte ainsi qu'une qualité d'image dégradée à 6m comparé aux faibles distances. Les auteurs ont cependant constaté un effet du context switching sur la fatigue oculaire subjective pour toutes les distances. Ils ont également constaté un effet négatif du focal distance switching sur le temps de réaction et la précision à la tâche, expliqué selon les auteurs par le temps nécessaire au système oculomoteur pour réaccommoder à une nouvelle distance focale.

Huckauf et al., (2010) ont évalué le context switching et quantifié le coût attentionnel associé au changement entre deux supports d'affichage (dispositif de RA transparent et écran d'ordinateur). Les auteurs ont contrôlé trois différences principales entre les informations du dispositif de RA transparent et de l'écran d'ordinateur (i.e., l'auto-illumination, l'arrière-plan et la taille d'affichage), afin de minimiser la ségrégation perceptive. Un paradigme de double tâche a été utilisé pour examiner les situations dans lesquelles l'attention visuelle est déjà maintenue sur un support et doit être portée sur un autre. Ils ont constaté que le passage d'un contexte à l'autre diminuait, à la fois les performances (temps de réaction et taux d'erreur) de la tâche principale (recherche visuelle), mais également de la seconde tâche (Go/NoGo, i.e., détecter la lettre P et ignorer la lettre R). Les auteurs ont alors conclu que l'utilisation d'un casque de RA transparent entraîne une

charge attentionnelle supplémentaire et suggèrent qu'elle pourrait être expliquée par un manque de familiarisation en comparaison aux écrans d'ordinateur.

Ces deux études ont utilisé des designs expérimentaux intéressants afin d'évaluer les conséquences du contexte et/ou du distance switching, mais elles ont été réalisées avec le Microvision Nomad, un HMD monoculaire. Or, les affichages monoculaires provoquent une rivalité binoculaire (voir Bayle et al., (2019) pour une revue) et ne fournissent pas d'indice de disparité binoculaire. De plus, le Microvision Nomad ne peut afficher que du contenu en couleur rouge. Ainsi, ce casque diffère largement des conditions d'affichage fournies par les HMD binoculaires commerciaux récents (e.g., Microsoft HoloLens2, Epson Moverio, Meta 2).

Étant donné que les conditions de visualisation diffèrent fortement entre les affichages binoculaires et monoculaires, il reste nécessaire d'évaluer le contexte et distance switching avec un HMD binoculaire moderne. Eiberger et al., (2019) ont évalué l'effet du changement de distance lorsqu'un HMD binoculaire transparent est combiné avec un smartphone ou une smartwatch. Les auteurs ont constaté que la réalisation d'une tâche de recherche visuelle sur deux plans de profondeur (projecteur à 0,31 m et HMD à 3,70 m) entraînait des temps de réaction et un taux d'erreur significativement plus élevés qu'avec un seul plan de profondeur. Cependant, dans cette étude, seule la différence de profondeur a été testée et la différence perceptive de contexte entre la condition HMD et projecteur n'a pas été considérée. Il n'est donc pas possible de savoir si la différence de temps de réaction et de taux d'erreur est due au distance switching ou au contexte switching, ou même aux deux.

Par ailleurs, dans ces trois études, la tâche utilisée est une recherche visuelle, qui consiste à rechercher volontairement une cible définie. Cette tâche permettait de connaître l'effet du contexte et distance switching sur la recherche intentionnelle d'une information connue. Néanmoins, étant donné les utilisations futures potentielles de la RA dans l'industrie, il semble essentiel d'examiner la détection par l'opérateur d'une information ou d'un événement inattendu (par exemple, un message d'alerte ou un danger). Par conséquent, l'objectif de la présente étude était d'évaluer l'effet du contexte et distance switching sur les ressources attentionnelles pour la détection d'informations inattendues, avec un HMD binoculaire récent.

Dans ce but, nous avons utilisé un design qui combine le contexte switching (informations réelles et virtuelles) et le distance switching (deux distances différentes), nous permettant de les évaluer séparément et ensemble. Les participants devaient effectuer une double tâche, la tâche principale étant une recherche visuelle et la seconde tâche, une détection de cibles imprévisibles. Ces cibles pouvaient être présentées sur deux écrans dont le contexte et/ou la distance pouvait varier. Les participants devaient alors basculer entre les deux écrans, donc à la fois entre du contenu réel et/ou virtuel ainsi qu'entre des écrans à la même distance ou non. Si les informations virtuelles en RA et celles du monde

réel constituent deux groupes perceptifs distincts, le passage de l'un à l'autre nécessiterait un déplacement d'attention, avec des temps de réaction et un taux d'erreur plus élevés.

Le faible niveau de familiarité global des utilisateurs pour la RA pourrait avoir un impact sur leur utilisation et performances en RA. En effet, la pratique des jeux vidéo influencent les capacités visuelles et attentionnelles et améliorent les compétences de base qui peuvent être appliquées à de nouvelles tâches et stimuli (Feng et al., 2007; Green & Bavelier, 2019, 2020; Green & Bavelier, 2006), les habitudes de jeux vidéo des participants et leurs expériences précédentes avec les technologies (RV et RA) ont été évaluées afin d'examiner leur impact potentiel. Par ailleurs, nous avons évalué l'impact du contexte et distance switching sur la charge mentale de travail à l'aide du *National Aeronautics and Space Administration Task load Index* (NASA-TLX; Hart & Staveland, 1988).

3.4.2 Méthode

Participants

Vingt-neuf volontaires (6 femmes, 23 hommes) ont été recrutés pour cette étude. Les participants étaient âgés de 19 à 40 ans ($M=24$; $ET=4.9$) et ont utilisé leur correction optique habituelle (lunettes, lentilles). Avant de participer, tous les volontaires ont été pleinement informés de la procédure expérimentale et ont signé un formulaire de consentement éclairé. Ils ont été rémunérés 15 euros pour leur participation. L'étude a été menée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki.

Matériel et stimuli

Un HoloLens 2 a été utilisé pour afficher les stimuli virtuels au cours de cette étude (voir paragraphe 1.2.3 pour une description des caractéristiques techniques). Unity a été utilisé pour le développement de l'application de l'HoloLens 2 ainsi que pour la fonctionnalité de suivi et d'enregistrement des données. Un écran Dell 22 pouces a également été utilisé pour l'affichage des stimuli. Les écrans virtuels ont été produits de sorte à respecter la taille des écrans réels (29cmx47cm).

Les stimuli présentés étaient constitués de 80 paires de matrices de 7x6 images (voir Figure 31 pour un exemple de matrice). Les matrices étaient composées d'images colorées d'objets écologiques appartenant à 12 catégories (e.g., tasses, chaises, appareils photo, voir Annexe 3), sélectionnées dans la base de données Caltech (Fei-Fei et al., 2004). Ces matrices ont été générées en utilisant C# et Unity. Chaque matrice est composée de 42 images sélectionnées à partir de 2 catégories d'objets. Du fait du nombre d'images nécessaires pour l'étude, une même catégorie pouvait être utilisée plusieurs fois, mais avec différentes images ou avec des combinaisons distinctes. Pour la moitié des paires de matrices, les deux matrices étaient identiques, pour l'autre moitié, elles étaient différentes. Dans ce dernier cas, une seule des 42 images d'une des deux matrices était changée et remplacée par une autre image appartenant à une des deux catégories présentées. L'image différente ne pouvait apparaître qu'au niveau des images situées dans les deux colonnes et trois lignes centrales des matrices.

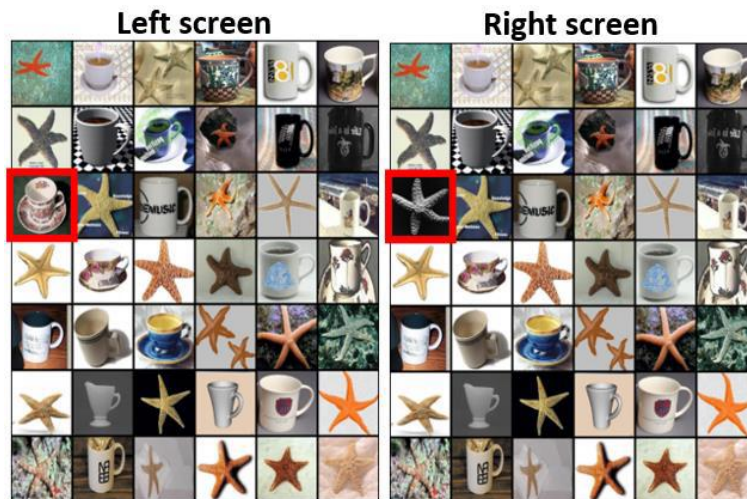


Figure 31 - Exemple d'une paire de matrices *différentes* : des cadres rouges ont été ajoutés pour aider le lecteur à identifier la différence entre les matrices.

Design expérimental

Cette étude a pour objectif d'étudier les effets du contexte et du distance switching, ensemble et séparément. Dans ce but, au cours de la procédure expérimentale, les participants sont positionnés en face de deux écrans, un à droite et un à gauche. Deux facteurs expérimentaux sont testés : le contexte switching (virtuel-virtuel, virtuel-réel) et le distance switching (adjacente, distante).

Dans la condition *virtuel-virtuel*, les deux écrans (droit et gauche) étaient virtuels (affichés en RA avec le casque HoloLens2). Dans ce cas, passer d'un écran à l'autre ne demandait pas de contexte switching.

Dans la condition *virtuel-réel*, l'écran de gauche était un moniteur réel et l'écran de droite un écran virtuel, un contexte switching est donc nécessaire pour passer de l'un à l'autre.

Pour la condition *adjacente*, les deux écrans étaient à la même distance du participant (i.e., 2m), ce qui n'implique pas de distance switching.

Pour la condition *distante*, l'écran de droite était à 2m et l'écran de gauche à 1.5m, ce qui demandait un distance switching pour passer de l'un à l'autre.

La combinaison de ces deux facteurs, permet d'étudier quatre conditions expérimentales (voir Figure 32) :

- Une condition contrôle sans contexte ni distance switching
- Une condition avec seulement un contexte switching sans distance switching
- Une condition avec seulement un distance switching sans contexte switching
- Une condition avec distance et contexte switching simultanément

Un design intra-sujet a été utilisé et l'ordre de présentation des quatre conditions a été contrebalancé en utilisant un carré latin équilibré.

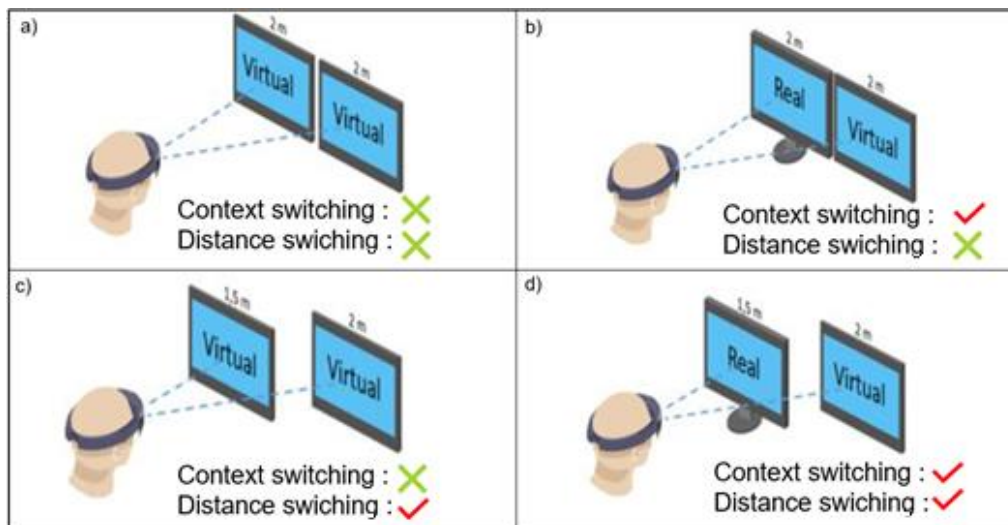


Figure 32 - Illustration des quatre conditions expérimentales, la condition contrôle (a), la condition avec seulement le contexte switching (b), la condition avec seulement le distance switching (c), et la condition avec le contexte et distance switching simultanément (d).

Procédure

Avant le début de la phase expérimentale, les instructions ont été expliquées aux participants, concernant les tâches expérimentales, ainsi que le positionnement correct de l'HoloLens2. Une courte phase de calibration permettait aux participants d'ajuster la position de l'HoloLens2, la hauteur de la mentonnière ou de la chaise, afin que les deux types d'écrans (réels et virtuels) soient bien positionnés. La phase expérimentale commençait une fois que le bon positionnement avait été obtenu et que le participant était prêt.

Au cours de chaque essai, une paire de matrices était présentée, une matrice sur chaque écran (voir Figure 33). Les participants devaient effectuer une tâche de comparaison entre les matrices de gauche et de droite, c'est-à-dire déterminer si les matrices étaient *identiques* ou *différentes* (ce qui se produisait pour la moitié des essais). Pour cette tâche, les participants recevaient comme informations qu'il n'y avait pas de limite de temps et pour consignes qu'ils devaient donc donner la priorité à la précision plutôt qu'à la vitesse. Les participants devaient répondre avec leur main non dominante, en appuyant sur la touche du clavier désigné « I » avec leur index pour les matrices identiques et « D » avec leur majeur pour les matrices différentes. Si les participants donnaient la bonne réponse, un son rapide était diffusé, en cas de mauvaises réponses aucun son n'était joué. Une fois que le participant avait répondu, la paire de matrices disparaissait et après un fond noir de 500 ms, une nouvelle paire de matrices était affichée. Pour cette tâche, le temps de réponse et la réponse ont été enregistrés.



Figure 33 - Participant dans la condition virtuel-réel adjacente. Afin de représenter ce que les participants voient dans l'HoloLens, une simulation de l'interface RA a été ajoutée à l'image.

Tout en effectuant cette tâche principale, les participants devaient également effectuer une seconde tâche, une tâche de détection de cible. La cible était un cercle rouge ($1,14^\circ$ en condition adjacente et $1,53^\circ$ en condition distante), qui apparaissait avec un intervalle de temps variable (8s ; 10s ; 12s ; 14s ; 16s), de manière pseudo-aléatoire (10 cibles pour chaque intervalle de temps). Lors de la réalisation de la tâche principale (i.e. la comparaison de matrices), les participants savaient donc qu'une cible pouvait apparaître, mais n'avaient pas d'information sur le moment d'apparition et la position de cette cible. Afin de s'assurer que la détection de la cible nécessite de passer d'un écran à l'autre, la position du regard des participants a été enregistrée en temps réel (à l'aide de l'eye tracker intégré au HoloLens2) pour générer la position de la cible. Ainsi, la cible était toujours présentée sur l'écran qui n'était pas regardé par le participant. Les cibles étaient présentées de manière aléatoire entre quatre positions potentielles (i.e., au milieu du quart : bas à gauche, bas à droite, haut à gauche, haut à droite). Pour cette tâche, les participants devaient répondre aussi vite que possible lorsqu'ils détectaient une cible, en utilisant leur main dominante et leur index pour appuyer sur le clic de la souris. Une fois la réponse donnée, la cible était retirée. Les matrices restaient cependant affichées et de nouvelles cibles pouvaient apparaître, jusqu'à ce que les participants répondent à la tâche principale.

Chaque bloc expérimental se terminait une fois que 50 cibles avaient été affichées (environ 15 minutes). À la fin de chaque bloc, un feedback indiquant le temps de réaction moyen était présenté aux participants. Une pause de 5 minutes était proposée aux participants, qui pouvaient se reposer, retirer le HoloLens2 et remplir le questionnaire

NASA-TLX. Ce questionnaire évalue la charge de travail mental selon six dimensions (demande mentale, demande physique, demande de temps, effort, performance et frustration). Pour réduire le temps de la procédure expérimentale, le NASA-TLX a été administré dans sa version simplifiée (Byers et al., 1989), dans laquelle les pondérations ne sont pas requises (voir Annexe 4). À la fin de la pause, les participants ont été invités à remettre l'HoloLens 2 et à effectuer la procédure de calibration avant le début du bloc suivant.

À la fin des quatre blocs, les participants ont rempli un questionnaire (voir Annexe 5) final sur leur état de santé visuelle et leurs expériences et habitudes antérieures avec les technologies (i.e., les jeux vidéo, la RV et la RA). L'ensemble de l'expérience a duré environ 90 minutes.

3.4.3 Résultats

Les analyses statistiques ont été effectuées avec JASP (JASP Team, 2019). Une ANOVA intra-sujet 2x2, a été réalisée avec le facteur context switching (virtuel-virtuel, virtuel-réel) et le facteur distance switching (adjacent, distant), à la fois pour la tâche principale et la tâche secondaire, ainsi que pour les scores au NASA-TLX. Les analyses ont été effectuées après avoir vérifié les conditions d'application des tests paramétriques. Le test de Shapiro-Wilk a été effectué pour s'assurer que les résidus étaient normalement distribués. Lorsque l'hypothèse de normalité était violée, une transformation logarithmique des données a été utilisée. Le test de sphéricité de Levene a été utilisé pour s'assurer que la variance des erreurs dans les groupes d'échantillons est équivalente.

3.4.3.1 Analyses confirmatoires

Tâche de comparaison de matrices

Les résultats de l'ANOVA (voir Figure 34) montrent un effet principal du distance switching sur le taux de bonne réponse $F(1, 28)=4.91$, $p=0.035$, $\eta_p^2=0.15$. Les participants ont effectué la tâche de comparaison d'images avec plus de précision lorsque les images étaient présentées sur deux écrans à la même distance ($M=84.95$, $ET=11.53$) que lorsqu'elles étaient éloignées ($M=82.16$, $ET=10.60$). Ni l'effet principal du context switching, ni l'effet l'interaction sur le taux de bonne réponse n'étaient significatifs ($ps >0.47$). Aucun effet principal et aucune interaction du distance et context switching n'ont été trouvés sur le temps de réponse à la comparaison d'images ($ps >0.45$).

Tâche de détection de cibles

Les analyses n'ont révélé aucun effet principal et aucune interaction du distance et context switching, ni sur les temps de réaction, ni sur le nombre d'omissions ($ps >0.19$).

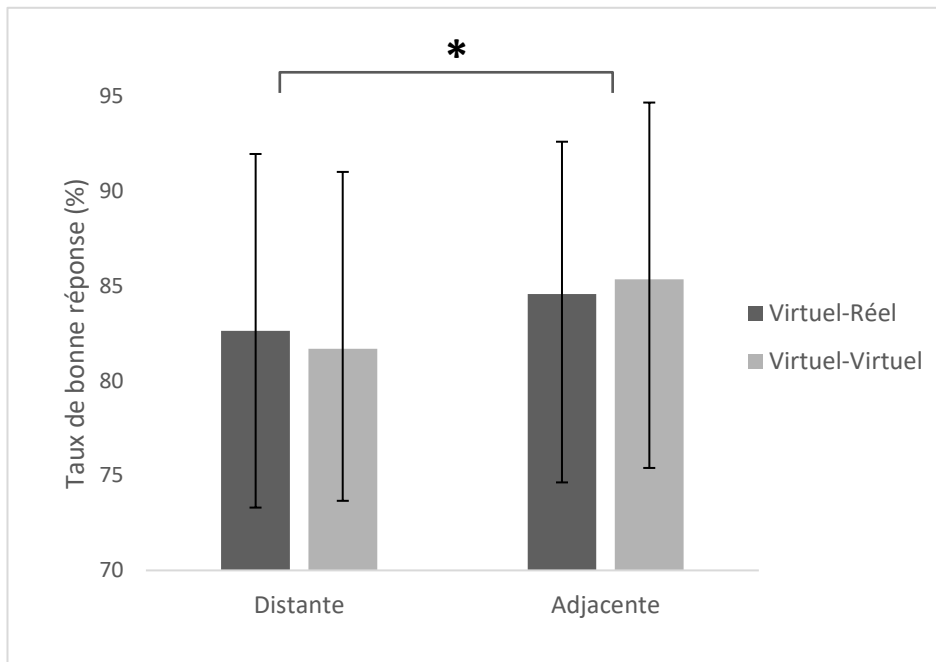


Figure 34 - Taux de bonne réponse (%) moyen à la tâche de comparaison de matrices, selon le contexte et la distance switching. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.

Charge mentale (NASA-TLX)

Seul un effet principal du context switching a été observé sur la dimension de demande temporelle de la charge mentale $F(1, 28)=4.34$, $p=0.046$, $\eta_p^2=0.13$. Les participants ont ressenti une pression temporelle plus élevée lorsque les informations étaient présentées uniquement sur des écrans virtuels ($M=39.75$, $ET=20.84$) que lorsqu'elles étaient sur un écran virtuel et un écran réel ($M=36.63$, $ET=19.48$). Aucun effet principal du distance switching et d'interaction n'ont été trouvés sur le score de demande temporelle ($ps > 0.07$). Par ailleurs, aucun effet principal et effet d'interaction n'ont été observés pour les autres dimensions de la charge mentale ($ps > 0.19$).

3.4.3.2 Analyses exploratoires

Le questionnaire post-expérimental a révélé que parmi les 29 participants, 16 jouaient fréquemment à des jeux vidéo, 19 avaient déjà utilisé la RV et 7 avaient déjà utilisé la RA. Considérant que les habitudes et le niveau d'exposition aux jeux vidéo et aux nouvelles technologies peuvent avoir un impact sur l'attention (Green & Bavelier, 2019; Green & Bavelier, 2006), nous avons vérifié l'effet possible de ces facteurs sur les performances aux deux tâches. Nous avons donc effectué trois groupes d'ANOVA complémentaires avec à chaque fois un facteur inter-sujet supplémentaire : pratique des jeux vidéo fréquente (oui, non), exposition à la RV avant l'étude (oui, non) et exposition à la RA avant l'étude (oui, non).

Pratique des jeux vidéo fréquente

Les différences individuelles dans les habitudes de jeux vidéo ont été prises en compte dans la réalisation d'ANOVA supplémentaires. Nous avons effectué une ANOVA mixte à trois facteurs sur les temps de réaction de la tâche de détection des cibles, avec le context switching et le distance switching comme facteurs intra-sujet et la pratique des jeux vidéo comme facteur inter-sujet (voir Figure 35). Un effet d'interaction de deuxième ordre significatif est observé $F(1, 27)=18.52, p<0.001, \eta_p^2=0.41$.

Pour les non-joueurs de jeux vidéo, l'analyse des effets simples a montré qu'il y avait une différence significative dans les temps de réaction entre la condition virtuel-virtuel et la condition virtuel-réel, lorsque les écrans étaient distants $F(1, 27)=13.28, p=0.003$, mais pas lorsque les écrans étaient adjacents $F(1, 27)=2.48, p=0.141$. Ainsi, pour les non-joueurs, en condition distante, les temps de réaction étaient plus rapides lorsqu'aucun context switching n'était nécessaire ($M=1,22, ET=0,24$) que lorsqu'il était nécessaire ($M=1,77, ET=0,54$).

Pour les joueurs de jeux vidéo, l'analyse des effets simples a montré qu'il y avait une différence significative dans les temps de réaction entre la condition virtuel-virtuel et la condition virtuel-réel, lorsque les écrans étaient distants $F(1, 27)=10.41, p=0.006$, mais pas lorsque les écrans étaient adjacents $F<1$. Ainsi pour les joueurs, en condition distante, les temps de réaction étaient plus lents lorsqu'aucun context switching n'était nécessaire ($M=1.65, ET=0.44$) comparé à lorsqu'il était nécessaire ($M=1.36, ET=0.34$). Par conséquent, les joueurs et les non-joueurs montrent un effet inverse du context switching sur le temps de réaction à la détection de la cible dans la condition distante.

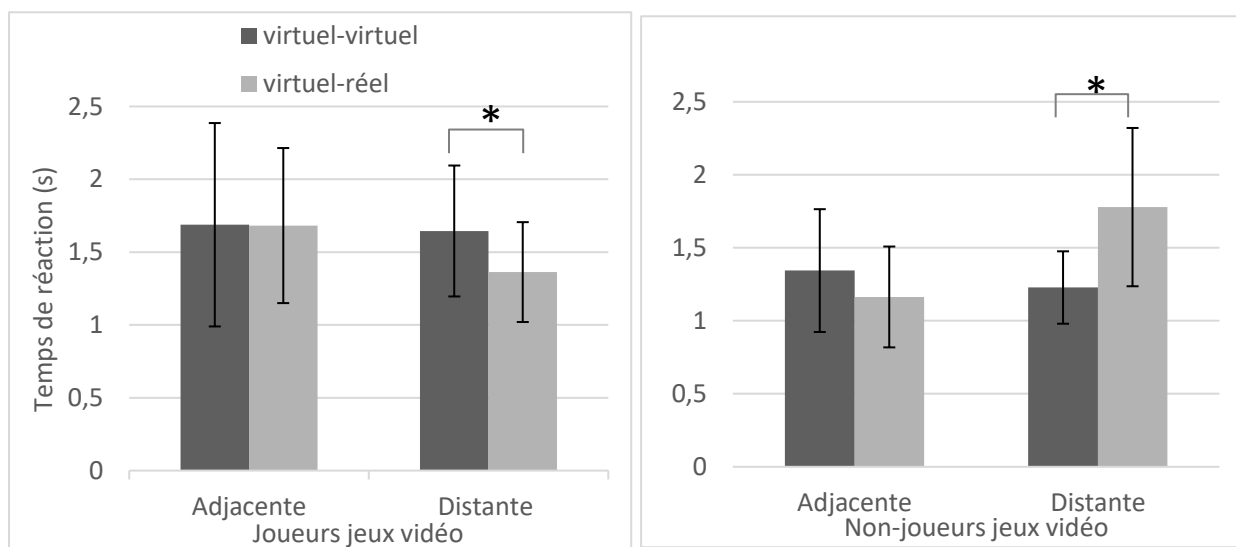


Figure 35 - Temps de réaction (s) moyen à la tâche de détection de cibles, pour les joueurs et non joueurs de jeux vidéo, selon le contexte et le distance switching. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.

L'ANOVA à trois facteurs sur le nombre d'omissions à la tâche de détection de cibles est non significative $F < 1$. Cependant, l'ANOVA à deux facteurs entre le context switching et le pratique des jeux vidéo est significative $F(1, 27) = 4.52, p < 0.043, \eta_p^2 = 0.14$. L'analyse des effets simples a montré que pour les joueurs, en condition adjacente, il y a plus d'omissions en condition virtuel-virtuel ($M = 5.8, ET = 5.3$) qu'en condition virtuel-réel ($M = 4.7, ET = 4.3$), $F(1, 27) = 7.97, p < 0.015$.

Concernant la tâche principale de comparaison de matrices, aucun effet principal ou d'interaction n'a été retrouvé, ni pour le temps de réponse, ni pour le taux de bonne réponse, $p_s > 0.206$.

Exposition à la RV et la RA

Seule l'ANOVA à deux facteurs avec le context switching et la pratique de la RV était significative, $F(1, 27) = 8.03, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.23$. L'analyse des effets simples a montré qu'en condition adjacente, les non-utilisateurs de RV, sont plus lents pour détecter la cible en condition virtuel-virtuel ($M = 30.06, ET = 8.48$) qu'en condition virtuel-réel ($M = 25.16, ET = 7.45$), $F(1, 27) = 11.30, p < 0.008$. Pour toutes les autres analyses avec le facteur pratique de la RV, $p_s > 0.206$. Aucune analyse avec le facteur inter-sujet pratique de la RA supplémentaire n'était significative (tous les $p_s > 0.16$).

3.4.4 Discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer le traitement attentionnel simultanés des informations virtuelles et réelles, et dans quelle mesure passer de l'un à l'autre implique un coût attentionnel. Pour ce faire, nous avons examiné l'effet du context et distance switching sur les performances à une double tâche associant : recherche visuelle et détection de cible simultanées.

Concernant le distance switching, conformément à notre hypothèse et en accord avec les études précédentes (Eiberger et al., 2019; Gabbard et al., 2019), les résultats montrent que les participants sont moins précis pour effectuer une comparaison d'images lorsque celle-ci doit s'effectuer entre deux écrans à des distances différentes (1,5m et 2m) qu'à la même distance. Néanmoins, les résultats de ces études précédentes étaient également soutenus par un effet sur les temps de réaction que nous n'avons pas retrouvé dans notre étude. Ce qui peut être expliqué par le fait que dans notre étude il n'y avait pas de pression temporelle pour la tâche de comparaison. Un impact du distance switching est également retrouvé sur la tâche de détection de cible. Ainsi les résultats des études précédentes et les nôtres suggèrent que le distance switching a un impact sur la précision d'une tâche de recherche visuelle portant sur des primitives visuelles telles que la forme, mais également sur des stimuli plus écologiques. Notre étude montre par ailleurs qu'une distance de seulement 50cm entre les informations était suffisante pour observer les effets du distance switching sur les performances visuelles d'un utilisateur.

Concernant le context switching, contrairement à nos hypothèses, les premiers résultats ne montraient aucun effet du context switching, ni sur la comparaison d'images ni sur la détection de cibles. Cependant, en considérant les distances utilisées dans cette étude (i.e., 1.50m et 2m), nos résultats sont congruents à ceux trouvés par Gabbard et al., (2019). En effet, dans leurs études, aucun effet du context switching n'a été montré sur les performances à 0,70m et 2m, mais seulement à 6m. Par ailleurs les auteurs ont expliqué la dégradation des performances observées par un manque de lisibilité du texte à 6m. La seule autre étude ayant montré un effet du context switching est celle d'Huckauf et al., (2010), qui l'ont observé à une courte distance avec un écran d'ordinateur à 0,61m. Les données disponibles actuellement ne nous permettent donc pas de savoir si le context switching se produit à des distances spécifiques, ni quelles sont ces distances.

Bien que ces premiers résultats n'aient pas révélé un effet du context switching, d'autres résultats sont observés lorsque les participants sont discriminés selon les différences individuelles en matière de pratique de jeu vidéo. En effet, lorsque les habitudes de jeu vidéo sont prises en compte, on observe un effet du context et distance switching, le context switching produisant un effet opposé chez les joueurs et les non-joueurs. En effet, alors que la détection d'une cible inattendue nécessitant le passage d'un écran réel à un écran virtuel, est plus facile pour les joueurs de jeux vidéo, cela est plus difficile pour les non-joueurs. L'effet opposé entre les deux groupes a donc masqué l'effet négatif du context switching sur les participants non-joueurs.

Une explication possible de cet effet inverse est une meilleure capacité d'attention visuelle des joueurs due à l'entraînement avec des jeux vidéo d'action (e.g., le jeu de tir à la première personne). Cet effet d'entraînement est d'ailleurs bien documenté dans la littérature (Green & Bavelier, 2019, 2020; Green & Bavelier, 2006), et serait associé à l'amélioration des performances de tâches de switching (Olfers & Band, 2018). Cependant, dans notre étude, même si les joueurs étaient plus rapides dans la condition virtuel-virtuel, ils ont également fait plus d'omissions. Ainsi, il semble que des biais ou des stratégies de réponses différentes (libéraux ou conservateurs) entre les participants soient une explication plus plausible qu'une réelle amélioration des capacités d'attention. Par ailleurs, ce résultat peut également s'expliquer par un niveau élevé de familiarité globale avec différents types d'écrans (écrans de smartphones, d'ordinateurs, de consoles de jeux).

Dans les deux cas, il semble possible que l'entraînement puisse influencer l'effet du context switching sur les performances visuelles. Ces données permettent de nuancer la conclusion faite par Gabbard et al., (2019), selon laquelle comme la RA fournit des informations virtuelles dans le monde réel, alors il y aura toujours un coût pour l'utilisateur lorsqu'il utilisera la RA. Ainsi, le coût pour l'utilisateur se produirait surtout si celui-ci n'est pas habitué aux technologies.

Ainsi dans notre étude, pour les utilisateurs non habitués aux différentes technologies, le fait d'intégrer des informations entre l'environnement réel et virtuel était associé à un

coût cognitif (i.e., des temps de réaction plus longs). Du point de vue de la ségrégation perceptive, les facteurs responsables d'une différence de traitement sont les couleurs, les indices de mouvements et de perspectives (Foyle et al., 1991). Dans notre étude, les indices de mouvements et de perspectives étant identiques entre les écrans virtuels et réels, les caractéristiques qui sont responsables d'une catégorisation entre l'information entre le virtuel et le réel et qui donnent lieu à des différences dans le temps de traitement, sont probablement dues aux indices de couleur. En effet, des différences dans les paramètres d'affichage telles que la résolution, la luminosité et le contraste ont été identifiées entre les écrans virtuels et réels et ont pu entraîner une ségrégation perceptive. Enfin, l'HoloLens2 de Microsoft présente des problèmes de chromatisme responsables de modifications des couleurs qui affectent seulement les écrans virtuels.

3.4.5 Conclusion

Dans la présente étude, nous avons examiné les effets du contexte et distance switching sur une double tâche de recherche visuelle et de détection de cible, utilisant un casque de RA transparent binoculaire, afin de combler des lacunes importantes identifiées dans la littérature. Nous avons constaté un impact du distance switching sur les performances des utilisateurs, alors même que la différence de distance entre les informations était faible (i.e., 50 cm). Par ailleurs, le context switching a eu un impact négatif sur les performances uniquement pour les non-joueurs de jeux vidéo mais pas pour les joueurs. Dans le contexte des applications industrielles, ces deux résultats suggèrent qu'il faut veiller à réduire au minimum les changements entre différentes distances mais également que l'entraînement pourrait modifier l'effet du context switching. Ainsi, mieux caractériser à l'avance le profil des futurs utilisateurs (donc des opérateurs) pourrait être un aspect central dans l'intégration de la RA en milieu industriel, étant donné son influence sur les performances. Enfin, notons que ni le changement de contexte ni le changement de distance n'ont eu d'impact sur la charge mentale de travail, à l'exception des participants qui ont ressenti un peu plus de pression temporelle lorsque les informations étaient présentées uniquement en RA.

Des travaux futurs pourraient poursuivre cette étude en évaluant comment l'impact du contexte switching évolue au cours d'une utilisation prolongée de la RA, ou examiner l'effet de certains paramètres, comme des intervalles plus importants de changement de distance et d'autres paramètres de stimuli. Les résultats de notre étude appellent également à de nouvelles études permettant d'identifier les paramètres d'affichage potentiellement responsables de la ségrégation perceptive entre les informations réelles et virtuelles en RA.

3.5 Étude 4 - Évaluation de l'orientation spatiale de l'attention en 3D en RA

Cette étude fait l'objet d'un article en cours de rédaction.

3.5.1 Introduction

La sélection des informations visuelles présentes dans notre environnement, peut s'exprimer de manière explicite, par des mouvements de la tête et des yeux, ou de manière implicite (paragraphe 3.2.2). Posner (1980) désigne le déplacement de l'attention en l'absence de mouvements oculaires manifestes par l'orientation implicite de l'attention visuelle (*covert orienting of visual attention*). Le paradigme d'indication spatiale (Posner & Cohen, 1984; Posner, 1980; Posner et al., 1980) a été développé afin de mesurer cette capacité à déplacer son attention visuo-spatiale sans mouvement oculaire vers différentes zones du champ visuel en 2D. La tâche développée consiste à demander aux participants de garder les yeux fixés sur une croix centrale et de répondre à l'apparition d'une cible en périphérie (à droite ou à gauche). Un indice précède l'apparition de la cible, celui-ci peut indiquer correctement la position de la cible (essai valide), ou peut indiquer la position opposée à la cible (essai invalide). De nombreuses études ont été réalisées en utilisant ce paradigme (pour des revues voir Lupiáñez et al., (2006) et Klein, (2000)), les résultats montrent l'existence de deux effets distincts : l'effet de facilitation et l'effet d'inhibition du retour (IOR, pour *Inhibition of return*).

Lorsque le temps entre l'indice et la cible est inférieur à environ 300ms, le temps de réaction aux essais valides est plus rapide que les temps de réaction pour les essais invalides. Cet effet de facilitation est expliqué par le fait que pour un essai valide, lors de l'apparition de l'indice, l'attention est engagée sur la position indiquée, ainsi lorsque la cible apparaît à la même position, l'attention est déjà engagée à cette position. Cependant, lorsqu'un indice est invalide, le participant engage son attention à la mauvaise position, lorsque la cible apparaît du côté opposé, le participant doit désengager son attention de l'indice, la déplacer vers la bonne position, puis la réengager sur la cible. Ces opérations cognitives supplémentaires nécessitent du temps et entraînent donc des temps de réponse plus longs. Cet effet de facilitation est observé à la fois dans le cas d'une orientation endogène et exogène de l'attention (paragraphe 3.2.2).

Lorsque le temps entre l'indice et la cible est supérieur à 300ms, le temps de réaction aux essais valides devient plus lent que pour les essais invalides. L'IOR désigne une inhibition à traiter des stimuli à une position qui a été précédemment traitée. Ainsi l'IOR retarde la détection d'une cible lorsque cette position a été indiquée au préalable. Cet effet d'IOR se produit uniquement dans le cas d'une orientation exogène de l'attention et serait un mécanisme adaptatif, permettant à l'organisme de favoriser le traitement de nouveaux stimuli (Klein & MacInnes, 1999; Rafal & Henik, 1994).

Les premiers résultats sur l'exploration de l'orientation implicite de l'attention, ont été observés avec des études utilisant principalement des affichages 2D (i.e., moniteurs).

Cependant, face au développement des dispositifs 3D telles que les lunettes ou les TV3D, l'analyse de la distribution de l'attention visuelle dans l'espace 3D a fait l'objet depuis les années 2000 de plusieurs études. De nombreuses études ont ainsi évalué s'il était possible de focaliser sélectivement son attention sur un plan en profondeur particulier et donc d'ignorer les informations sur un autre plan. Ces études ont été principalement centrées sur l'évaluation de l'effet de facilitation (e.g., Atchley & Kramer, 2001; Couyoumdjian et al., 2003; Han et al., 2005; Theeuwes et al., 1998). Les auteurs ont adapté le paradigme d'indication spatiale en profondeur, avec deux plans de profondeurs différentes (un avant et un arrière) ainsi que des indices qui pouvaient donc être valides, ou invalides selon le côté ou selon la profondeur. Les résultats de ces études montrent un effet de facilitation lorsque l'indice et la cible appartiennent au même plan comparé à lorsque l'indice et la cible sont sur deux plans en profondeur distincts. Il a donc été conclu de façon consensuelle que l'effet de facilitation de l'attention est sensible à la profondeur.

A contrario, la façon dont se produit l'IOR en profondeur dans l'espace en 3D, a fait l'objet de peu d'étude depuis 2003. Theeuwes & Pratt (2003) ont étudié si l'IOR est reproduit dans l'espace en 3D, par une adaptation du paradigme d'indication spatiale, en présentant comme stimuli, quatre figures rectangulaires en forme de 8. Les participants voient donc deux figures-8 de chaque côté : droit et gauche, mais également en avant et en arrière (donc quatre au total). Les auteurs ont observé que si une position (droite ou gauche) est indiquée, alors le plan de profondeur situé devant ou derrière cette position est inhibée. Ils concluent ainsi que l'IOR n'est pas seulement limité à la 2D, mais se produit également en 3D.

Bourke et al., (2006) mettent en évidence que dans l'étude de Theeuwes & Pratt (2003), les figures-8 du plan avant occultent partiellement celles du plan arrière, rendant l'identification des cibles plus difficile. Bourke et al., (2006) ont donc réalisé une réplique de cette étude, en augmentant la séparation horizontale entre les deux figures-8 présentées de chaque côté afin d'éviter tout chevauchement. Ils ont également évalué la distinction entre IOR basé sur l'objet et l'IOR basé sur l'espace. Afin de tester l'IOR basé sur l'objet, Bourke et al., (2006) ajoutent une modification supplémentaire au paradigme en reliant les deux figures-8 de chaque côté, afin de former deux cubes en 3D. Ainsi, lorsque la figure-8 gauche en avant est indiquée, elle devrait produire un IOR pour la figure-8 gauche en arrière, car faisant partie du même objet. Les résultats de leur étude montrent que l'IOR basé sur l'espace, repose sur une représentation 2D et est aveugle à la profondeur, tandis que, l'IOR basé sur l'objet opère dans une représentation 2D et 3D.

Dans une étude, utilisant une autre adaptation du paradigme d'indication spatiale, Casagrande et al., (2012) ont observé que l'IOR basé sur l'objet ainsi que l'IOR basé sur l'espace se produisait en 3D. Enfin, Wang et al., (2016) ont utilisé une adaptation du paradigme d'indication spatiale et ont également observé un IOR en profondeur, mais sans distinguer le type d'IOR.

Les études qui ont examiné les différents types d'IOR en profondeur ont toutes utilisées des lunettes 3D à cristaux liquides afin de tester l'espace tridimensionnel. Malgré leur

fort développement, les dispositifs de RA n'ont pas été pris en compte dans les études sur les mécanismes d'allocation spatiale des ressources attentionnelles en profondeur. Or, comme le suggèrent des études sur le context switching, y compris notre étude 3, le traitement attentionnel peut différer entre les informations réelles et virtuelles.

La présente étude a pour objectif d'apporter des premiers éléments de réponse relatifs à l'orientation de l'attention en profondeur en RA et ainsi d'évaluer dans quelle mesure les effets d'IOR observés sont répliqués en RA. Nous souhaitons également identifier si l'allocation de l'attention en profondeur est différente lorsqu'elle porte en même temps sur des stimuli réels et virtuels. Dans ce but nous avons choisi d'effectuer une réplique de la procédure d'indigage spatial utilisée par Bourke et al., (2006), en l'adaptant avec une interface en RA, afin d'obtenir des données comparables à celles des autres études déjà réalisées.

Si l'allocation de l'attention en RA opère dans une représentation 2D et 3D, alors nous devrions répliquer les résultats de Bourke et al., (2006) et observer un IOR basé sur l'objet en 3D. Si les informations réelles et virtuelles forment deux groupes perceptifs différents, et sont traitées différemment par le système visuel, alors nous devrions observer un pattern de résultats différents à celui observé lorsque les informations sont uniquement virtuelles.

3.5.2 Méthode

Participants

Trente volontaires (18 femmes, 12 hommes) ont participé à cette étude réalisée dans les locaux de la faculté de psychologie de l'Université de Bretagne Occidentale. Les participants inclus dans cette étude étaient âgés de 18 à 43 ans ($M=22.86$, $ET=5.02$). Les participants ont utilisé leur correction optique habituelle (lunettes ou lentilles de contact). Avant de participer, tous les volontaires ont été pleinement informés de la procédure expérimentale et ont signé un formulaire de consentement éclairé. L'étude a été menée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki.

Matériel et stimuli

Les stimuli virtuels ont été affichés avec le casque Microsoft HoloLens 2. Les stimuli réels ont été affichés sur un moniteur LCD Dell de 22 pouces.

Les stimuli présentés (pour rappel, identiques à l'étude de Bourke et al., (2006)) étaient trois plans de profondeur différentes (voir Figure 36) : un plan central à 75 cm des yeux du participant correspondant à une croix de fixation centrale (0.76° d'angle visuel), ainsi qu'un second plan en avant et un troisième en arrière du plan central avec quatre figures-8 grises ($1,3^\circ \times 2,5^\circ$) dessinées avec des lignes blanches ($0,12^\circ$) et présentées à $4,4^\circ$ sur les côtés gauches et droits de la croix de fixation. Les figures-8 dans le plan arrière étaient décalées de $1,74^\circ$ horizontalement et de $0,3^\circ$ verticalement. La disparité binoculaire entre les plans avant et arrière était de ± 15 min d'arc par rapport au plan central (soit ± 33 mm). Les indices utilisés correspondaient à une figure-8 mise en surbrillance (i.e.,

augmentation de l'épaisseur par un facteur 3) et les cibles à une figure-8 dont certains segments étaient supprimés pour former soit un "H" soit un "S".

Design expérimental

Trois facteurs ont été utilisés dans cette étude : le type d'attention (*object-based* ; *space-based*), le contexte d'affichage : (2 plans en RA ; 1 plan réel et 1 plan en RA) et le type d'essai (*valide* ; *invalide profondeur* ; *invalide coté* ; *invalide total*). Le croisement des facteurs attention et contexte d'affichage permet d'étudier quatre conditions expérimentales (voir Figure 36). La condition *object-based* est identique à la condition *space-based*, à l'exception des figures-8 reliées de chaque côté par les coins avant et arrière et formant ainsi une seule et même figure.

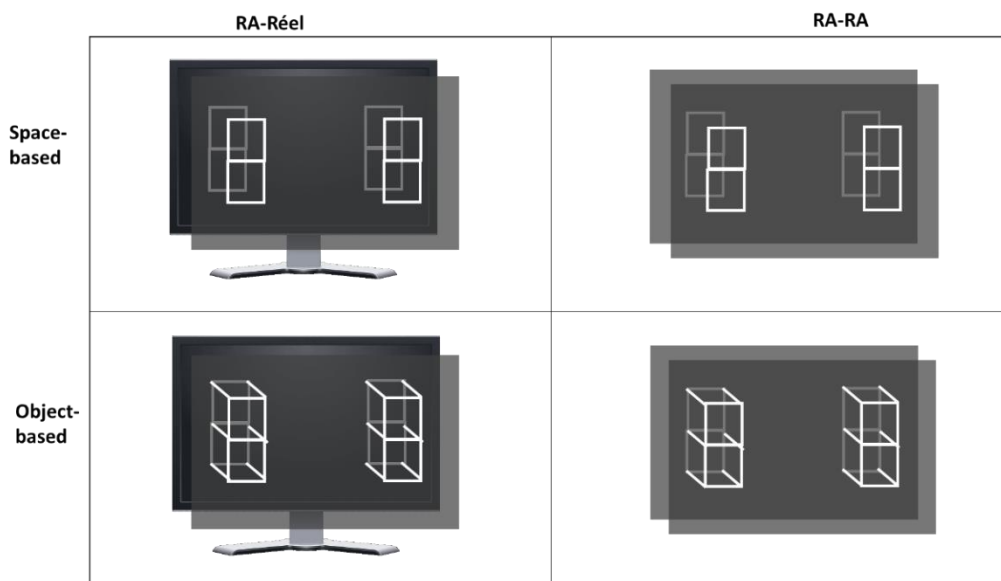


Figure 36 - Illustration de la configuration des stimuli selon le type d'attention et le contexte de présentation. Pour la séquence complète d'un essai, voir la Figure 38.

Il y avait quatre types d'essais différents, définis par la relation entre la position de l'indice et de la cible (Voir Figure 37 pour un exemple) :

- Essai « valide » : indice et cible à la même profondeur et du même côté ;
- Essai « invalide profondeur » : l'indice et la cible apparaissent du même côté, mais pas à la même profondeur ;
- Essai « invalide coté » : l'indice et la cible apparaissent à la même profondeur, mais pas du même côté ;
- Essai « invalide total » : l'indice et la cible apparaissent sur un côté différent et à une profondeur différente.

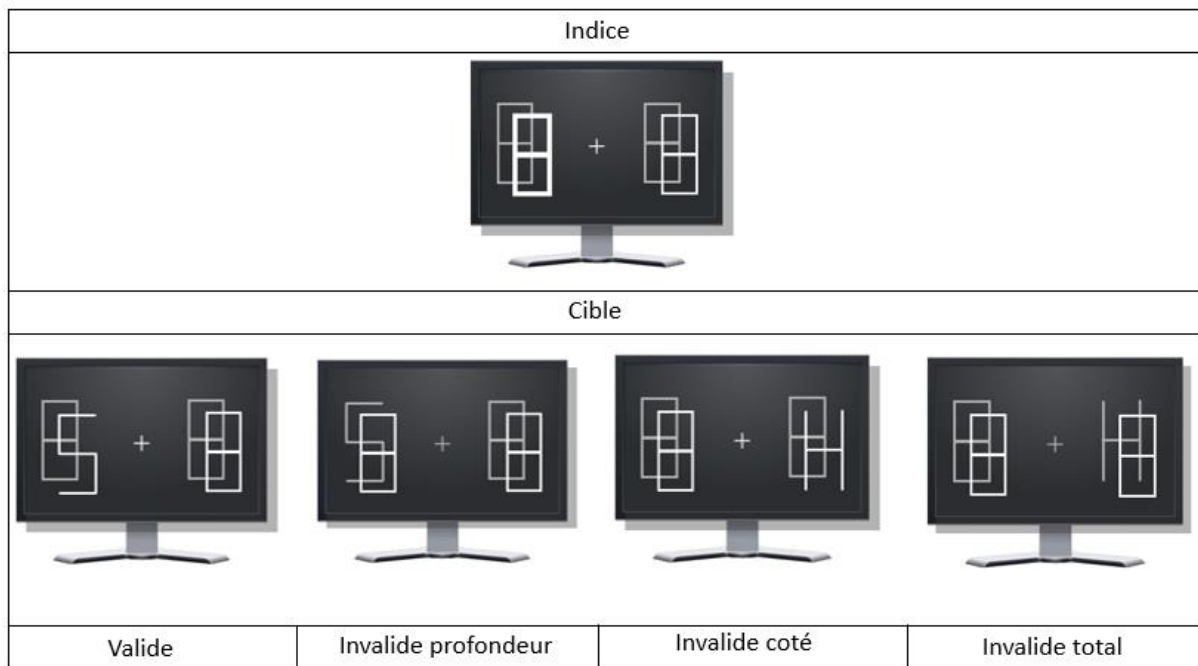


Figure 37 - Illustration de la configuration des stimuli selon les quatre types d'essai (dans la condition space-based)

Notons que pour chacun de ces quatre types d'essai, plusieurs trajectoires sont possibles entre la cible et l'indice, par exemple pour les essais invalides total, on retrouve quatre trajectoires différentes : (i.e., indice à droite sur le plan avant et cible à gauche sur le plan arrière ; indice à droite sur le plan arrière et cible à gauche sur le plan avant ; indice à gauche sur le plan avant et cible à droite sur le plan arrière ; indice à gauche sur le plan arrière et cible à droite sur le plan avant).

Pour chacune des quatre conditions expérimentales, il y avait six blocs consécutifs (un d'entraînement et cinq expérimentaux), soit un total de 20 blocs dans l'étude. Un design intra-sujet a été utilisé et l'ordre des conditions était contrebalancé entre les participants à l'aide d'un carré latin équilibré. Chaque bloc comprenait 32 essais correspondant à la combinaison factorielle des quatre positions d'indices (avant gauche, arrière gauche, avant droit, arrière droit), avec les quatre positions de cibles (avant gauche, arrière gauche, avant droit, arrière droit) ainsi que les deux types de cibles (H, S), soit un total de 128 essais d'entraînement et 640 essais expérimentaux pour chaque condition expérimentale. L'orientation exogène de l'attention étant évaluée dans cette étude, il n'y avait aucune relation entre l'emplacement de l'indice et l'emplacement de la cible, c'est-à-dire que la validité de l'indice était de 25 %.

Procédure

La position des participants était fixée à 75 cm de l'écran, à l'aide d'une mentonnière. La Figure 38 présente la séquence d'un essai. Un essai commençait après la présentation d'un écran noir pendant 500ms. Ensuite, une croix de fixation centrale et les quatre

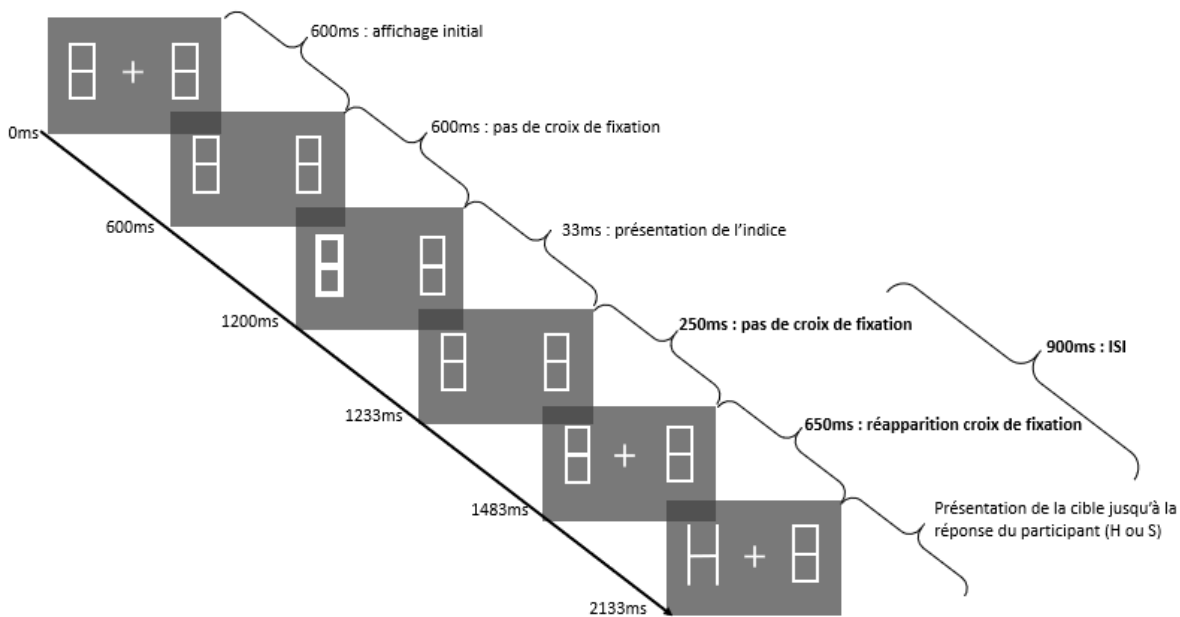


Figure 38- Illustration de la séquence complète d'un essai type.

figures-8 étaient présentées, pendant 600 ms, avant que la croix de fixation ne disparaisse. 600 ms après, l'indice (i.e., figure-8 en surbrillance) était présenté pendant 33 ms, puis après un intervalle interstimuli (ISI) de 900 ms, la cible (H ou S) était affichée jusqu'à ce que le participant donne sa réponse. Conformément à la procédure utilisée par Bourke et al., (2006), la croix de fixation était représentée 250 ms après la fin de la surbrillance de l'indice et restait présente jusqu'à la fin de l'essai.

Les participants devaient fixer la croix de fixation centrale et ne pas faire de mouvements oculaires pendant l'essai. La tâche du sujet était d'identifier et de répondre aux cibles aussi rapidement et précisément que possible. Les réponses et les temps de réaction étaient enregistrés à l'aide de deux touches du clavier désignées « S » et « H » (position contrebalancée entre les participants). À la fin de chaque condition, un feedback sur le temps de réponse moyen et le pourcentage d'erreurs du participant était affiché. À la fin de l'étude, les participants ont rempli un questionnaire (voir Annexe 5) final sur leur état de santé visuelle et leurs expériences et habitudes antérieures avec les technologies (i.e., les jeux vidéo, la RV et la RA). L'expérience entière durait environ une heure.

3.5.3 Résultats

Les analyses statistiques ont été effectuées avec JASP (JASP Team, 2019). Les temps de réaction inférieurs à 100ms et supérieurs à 1000ms ont été supprimés, représentant une perte de 10.52% des essais. Les analyses ont été effectuées après avoir vérifié les conditions d'application des tests paramétriques. Le test de Shapiro-Wilk a été effectué pour s'assurer que les résidus étaient normalement distribués. Le test de sphéricité de Levene a été utilisé pour s'assurer que la variance des erreurs dans les groupes d'échantillons est équivalente.

3.5.3.1 Analyses sur les temps de réaction bruts

Une ANOVA intra-sujet 2x2x4, a été réalisée avec le facteur type d'attention (object-based ; space-based), le contexte d'affichage : (virtuel-virtuel, virtuel-réel) et le type d'essai (valide ; invalide profondeur ; invalide côté, invalide total), sur les temps de réaction aux bonnes réponses.

Un effet principal du type d'attention est observé, $F(1, 29)=17.44$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.376$. Les temps de réaction sont plus longs dans la condition object-based ($M=654.07$, $ET=75.98$) que dans la condition space-based ($M=626.04$, $ET=68.16$). Un effet d'interaction entre le type d'attention et les essais a également été retrouvé $F(3, 87)=3.37$, $p=0.022$, $\eta_p^2=0.104$. On observe aussi un effet d'interaction entre le type d'attention, d'essai et de contexte, $F(3, 87)=3.07$, $p=0.032$, $\eta_p^2=0.096$, indiquant que l'effet du type d'attention sur les temps de réaction n'est pas le même selon le contexte d'affichage. L'analyse des effets simples montre une différence significative entre les essais dans la condition space-based, pour la condition virtuel-réel $F(3, 87)= 2.52$, $p=0.018$, mais pas pour la condition virtuel-virtuel $F(3, 87)=1.51$, $p=0.217$. De la même manière pour la condition object-based, on retrouve une différence significative entre les essais pour la condition virtuel-réel $F(3, 87)=3.63$, $p=0.016$, mais pas pour la condition virtuel-virtuel $F<1$. Ces analyses ne permettant pas d'identifier où se trouvent les différences entre les différents types d'essais, des comparaisons complémentaires deux à deux ont donc été réalisées. Ces dernières montrent qu'en condition space-based seulement, les temps de réaction aux essais invalides côté sont plus courts que pour les essais valides, à la fois en condition virtuel-virtuel, $t(1,29)$, $p=0.045$, mais également en condition virtuel-réel, $t(1,29)$, $p=0.026$. Cette différence entre les essais valides et invalides côté, correspond à l'effet d'IOR horizontal classiquement observé en 2D. Les moyennes et écarts-types des temps de réaction sont présentés dans la Table 6.

Table 6 - Moyennes et écarts-types des temps de réaction, selon le type d'essai, d'attention et de contexte d'affichage.

	Virtuel-Virtuel		Virtuel-Réel	
	Space-based	Object-based	Space-based	Object-based
Invalide côté	626,43 (67,11)*	653,5 (64,94)	614,78 (70,37)*	653,64 (89,91)
Invalide	628,97 (65,01)	651,64 (69,21)	621,96 (68,00)	661,84 (85,90)
Invalide profondeur	631,33 (60,04)	655,58 (70,04)	627,17 (73,28)	646,19 (76,68)
Valide	633,72 (66,42)	653,32 (63,62)	624,39 (75,04)	656,88 (87,49)

Les astérisques font référence à une différence significative avec les essais valides. * significatif à 0.05

Ces comparaisons supplémentaires ne montrent pas de différence significative entre les essais valides et invalides profondeur, en condition virtuel-virtuel, ni en object-based ni en space-based ($p > 0.272$). La condition virtuel-virtuel étant équivalente à la condition expérimentale de Bourke et al., (2006) avec les deux plans 3D, nous pouvons en conclure que nous ne répliquons pas l'IOR en profondeur observé par ces auteurs en condition object-based.

3.5.3.2 Analyses sur l'effet d'indiçage

Afin d'évaluer l'effet de validité de l'indice classiquement analysé dans l'étude de l'attention (Egly et al., 1994), des scores d'invalidité ont été calculés correspondant à : temps de réaction aux essais valides - temps de réaction aux essais invalides. Trois scores d'invalidité différents ont été calculés correspondant aux trois types d'essais invalides (i.e., invalide total, invalide profondeur, invalide côté). Ces scores permettent d'étudier les effets de facilitation et d'IOR, avec un score positif indiquant un effet d'IOR et un score négatif indiquant un effet de facilitation.

Des analyses ont donc été réalisées sur ces scores d'invalidité et en particulier ceux pour les essais invalides profondeur, en lien avec notre problématique de l'orientation de l'attention en profondeur. Les moyennes et écarts-types des temps de réaction sont présentés dans la Table 7. Une ANOVA à deux facteurs (attention et contexte d'affichage) a été réalisée sur les scores d'invalidité profondeur. Aucun effet principal de l'attention, ni du contexte n'a été retrouvé ($p > 0.324$). Néanmoins, une interaction significative entre l'attention et le contexte d'affichage est observée, $F(1, 29) = 4.26$, $p = 0.048$, $\eta_p^2 = 0.128$, indiquant également que l'effet du type d'attention sur les temps de réaction diffère selon le contexte d'affichage. L'analyse des effets simples ne montre pas de différence significative des scores d'invalidité profondeur entre les conditions space-based et object-based, ni en condition virtuel-virtuel $F < 1$, ni en condition virtuel-réel, $F(1, 29) = 3.29$, $p = 0.080$.

Table 7 - Moyennes et écarts-types de l'effet d'indiçage (temps de réaction aux essais valides - temps de réaction aux essais invalides profondeur), selon le type d'attention et

le contexte d'affichage.		
Attention	Contexte affichage	
	Virtuel-Virtuel	Virtuel-Réel
Object-based	-2.26 (9.16)	10.69 (23.30)
Space-based	1.93 (7.25)	-2.79 (12.54)

Dans l'objectif d'examiner également l'effet des différentes trajectoires possibles au sein des essais invalides, des analyses supplémentaires prenant en compte le facteur trajectoire ont été réalisées. Afin d'évaluer les différences entre les plans en profondeur, les deux trajectoires des essais invalides profondeur ont été analysées (i.e., indice sur le plan avant et cible sur le plan arrière ; indice sur le plan arrière et cible sur le plan avant). L'ANOVA à trois facteurs (attention, contexte et trajectoire d'essai invalide profondeur) réalisée sur

les scores d'invalidité profondeur révèle un effet principal de la trajectoire d'essai invalide profondeur, $F(1, 27)=76.28$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.739$. Le score d'invalidité profondeur est positif ($M=17.94$, $ET=32.20$) lorsque l'indice est sur le plan avant et la cible sur le plan arrière, tandis qu'il est négatif ($M=-17.41$, $ET=25.01$) lorsque l'indice est sur le plan arrière et la cible sur le plan avant. L'analyse montre également une interaction entre le contexte et la trajectoire d'essai invalide profondeur $F(1, 27)=82.18$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.753$ (voir Figure 39). L'analyse des effets simples montre des différences significatives entre les conditions virtuel-virtuel et virtuel-réel, pour les essais invalides profondeur dont l'indice est sur le plan avant et la cible sur le plan arrière $F(1, 27)=32.03$, $p<0.001$, mais également pour ceux dont l'indice est sur le plan arrière et la cible sur le plan $F(1, 27)=28.26$, $p<0.001$. Ainsi, pour les essais invalides profondeur dont l'indice est sur le plan arrière et la cible sur le plan avant, les scores d'invalidité profondeur est négatif en condition virtuel-réel ($M=-31.43$, $ET=25.13$), et virtuel-virtuel ($M=-3.40$, $ET=24.89$), ce qui indique un effet de facilitation. Un t de student réalisé sur les temps de réaction de cette trajectoire en condition virtuel-réel, montre qu'il sont significativement plus courts pour les essais valides qu'invalides, $t(1,29)$, $p<0.001$, indiquant un effet de facilitation de 31ms (voir Figure 39). Pour les essais invalides profondeur dont l'indice est sur le plan avant et la cible sur le plan arrière, le score d'invalidité profondeur est positif en condition virtuel-réel ($M=32.80$, $ET=29.59$), et virtuel-virtuel ($M=3.08$, $ET=24.81$), ce qui indique un effet d'IOR. Un t de student réalisé sur les temps de réaction de cette trajectoire en condition virtuel-réel, montre qu'il sont significativement plus longs pour les essais valides qu'invalides, $t(1,27)$, $p<0.001$, indiquant un effet d'IOR de 32ms (voir Figure 39).

Le même pattern de résultats est observé avec l'analyse des différentes trajectoires d'essais invalides total (i.e., indice n'apparaissant pas sur le même plan ni le même côté que la cible). L'ANOVA à trois facteurs (attention, contexte et trajectoire d'essai invalide total) réalisée sur les scores d'invalidité révèle un effet principal de la trajectoire d'essai invalide, $F(3, 78)=27.56$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.515$. Une interaction significative est également retrouvée entre les trois facteurs $F(3, 78)=38.23$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.595$. L'analyse des effets simples, montre également en condition virtuel-réel, un effet de facilitation pour les deux trajectoires d'essais invalide total dont l'indice est sur le plan arrière et la cible sur le plan avant ($M=-32.82$, $ET=32.39$; $M=-29.99$, $ET=30.75$) ($ps<0.001$). Un t de student réalisé sur les temps de réaction de ces trajectoires en condition virtuel-réel, montre qu'ils sont significativement plus courts pour les essais valides qu'invalides, $t(1,29)$, $p<0.001$, indiquant un effet de facilitation de 30ms.

Il est également retrouvé, en condition virtuel-réel, un effet d'IOR pour les deux trajectoires d'essais invalide total dont l'indice est sur le plan avant et la cible sur le plan arrière ($M=31.93$, $ET=35.72$; $M=20.01$, $ET=43.90$), ($ps<0.043$). Un t de student réalisé sur les temps de réaction de ces trajectoires en condition virtuel-réel, montre qu'ils sont significativement plus courts pour les essais valides qu'invalides, $t(1,29)$, $p<0.001$, indiquant un effet d'IOR de 33ms.

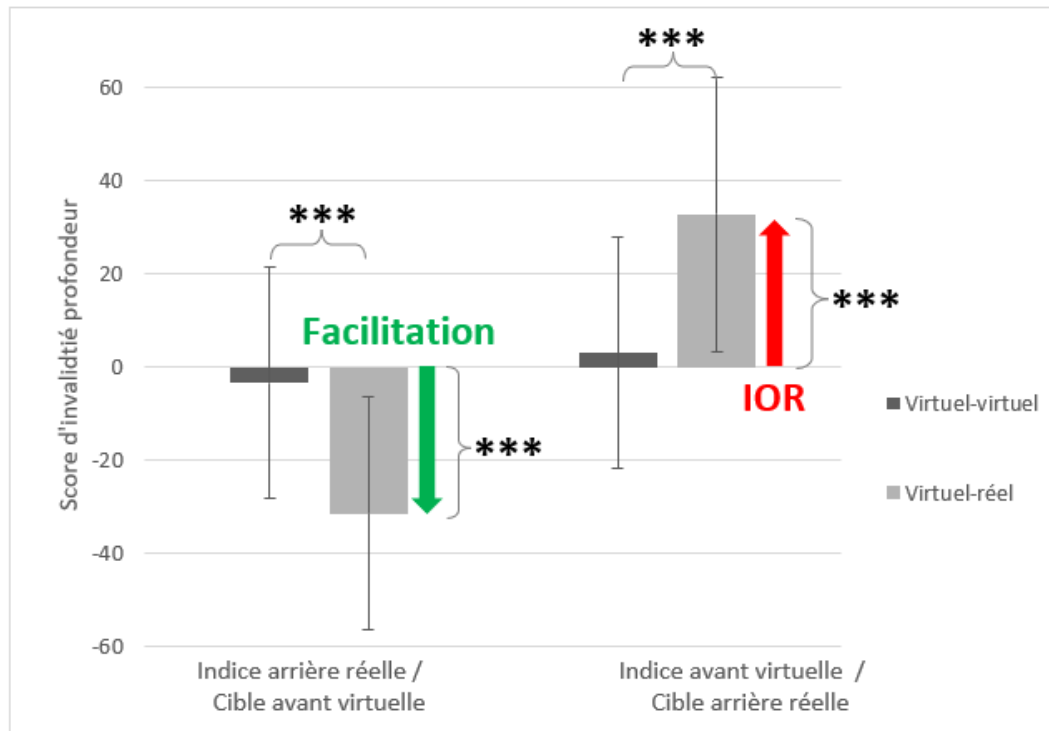


Figure 39 - Effet d'indigage (temps de réaction aux essais valides - temps de réaction aux essais invalides profondeur) en fonction du contexte d'affichage et de la trajectoire d'essai invalide profondeur. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. *** Significatif à 0.001.

3.5.4 Discussion

L'objectif de cette étude était d'apporter les premiers éléments de réponse relatifs à l'orientation de l'attention en profondeur en RA et de ainsi déterminer si l'effet d'IOR peut être répliqué en RA. L'objectif était également d'identifier si l'allocation de l'attention en profondeur est différente lorsqu'elle porte en même temps sur des stimuli réels et virtuels. Pour ce faire nous avons choisi d'utiliser le paradigme d'indigage spatial (Posner, 1980) et d'effectuer une réplification de la procédure utilisée par Bourke et al., (2006), en utilisant un ISI de 900ms afin d'étudier l'effet d'IOR et en l'adaptant avec une interface en RA.

Les résultats de notre étude montrent qu'en space-based avec un ISI de 900ms, les temps de réaction sont plus longs pour les essais valides que les essais invalides côtés, ce qui correspond à l'effet d'IOR horizontal classiquement retrouvé dans les études en 2D (Klein, 2000; Lupiáñez et al., 2006). Cette inhibition pour le traitement des stimuli à une position qui a été précédemment traitée est d'ailleurs retrouvée quel que soit le contexte d'affichage (i.e., virtuel-virtuel, virtuel-réel). Ceci confirme la robustesse de l'effet d'IOR horizontal et suggère que ce mécanisme qui favorise le traitement de nouveaux stimuli s'applique également aux stimuli virtuels présentés en RA.

Bien que notre étude réplique l'effet d'IOR horizontal, elle ne réplique pas l'effet d'IOR en profondeur observé par Bourke et al., (2006), en condition object-based. Ces auteurs ont observé en condition object-based, un effet d'IOR horizontal classique mais également un IOR en profondeur de 25ms. Afin de mieux approfondir l'analyse des effets d'IOR en profondeur et pourquoi celui-ci n'est pas répliqué, nous avons analysé l'effet d'indication (essais valides - invalides). Nous avons observé que l'effet d'invalidité des essais invalides en profondeur diffère selon le type d'attention et entre en interaction avec le type d'affichage, ce qui nous a amenés à considérer plus en détail la différence entre les différentes trajectoires des essais invalides.

L'analyse des trajectoires d'essais invalides en profondeur montre qu'ils produisent des effets opposés uniquement en condition virtuel-réel (le même pattern est par ailleurs également observé en condition essais invalides total). En effet, les temps de réaction aux essais valides sont plus courts comparés aux essais invalides en profondeur dont l'indice est sur le plan arrière et la cible sur le plan avant, produisant un effet de facilitation significatif de 31ms. Cet effet de facilitation est néanmoins surprenant compte tenu de l'ISI utilisé dans cette étude. En effet, l'effet de facilitation se produit classiquement seulement pour des ISI courts i.e., 200 à 300ms (Posner & Cohen, 1984).

Les résultats de l'analyse des trajectoires montrent également que les temps de réaction aux essais valides sont plus longs comparés aux essais invalides en profondeur dont l'indice est sur le plan avant et la cible sur le plan arrière, produisant un effet d'IOR en profondeur significatif de 32ms. Ainsi, bien qu'il n'apparaisse que pour une seule trajectoire d'essai invalide en profondeur, nous observons tout de même un effet d'IOR en profondeur à la fois dans la condition object-based mais également space-based. Ceci suggère que l'orientation de l'attention qui porte sur des informations virtuelles en RA est basée sur une représentation qui inclut des informations de profondeur. Ces résultats sont cohérents avec les études montrant que la composante object-based de l'IOR est sensible à la profondeur (Bourke et al., 2006), mais également la composante space-based (Casagrande et al., 2012). Le fait que nous observions l'effet d'IOR horizontal et d'IOR en profondeur, à la fois en condition object-based et en space-based, peut être expliqué par le rôle adaptatif du mécanisme d'IOR (Klein, 2000). Notre monde étant constitué de multiples objets en 3D réparties dans différents plans de l'espace, l'IOR qui assure l'efficacité de l'exploration visuelle de notre environnement visuel s'applique donc sur les plans 2D et 3D.

Nos résultats indiquent donc une asymétrie dans l'orientation de l'attention selon la trajectoire en profondeur et ne vont pas dans le même sens que ceux de Theeuwes et Pratt (2003) ayant observé un IOR symétrique selon les trajectoires. Une explication à cette divergence provient du fait que dans l'étude de Theeuwes et Pratt (2003), les deux plans en profondeur sont présentés dans les lunettes 3D et donc de même contexte. Or dans notre étude, dans la condition virtuel-réel, le plan avant est celui en RA et le plan arrière est réel. Ainsi, les résultats précédents peuvent laisser penser qu'il est plus rapide de détecter une cible réelle après un indice en RA, à l'inverse il est plus difficile de

détecter une cible en RA après un indice réel. Nous observons un pattern de temps de réaction différent selon le contexte d'affichage, indiquant que le traitement attentionnel diffère lorsque celui-ci porte sur des stimuli uniquement virtuels ou sur des stimuli virtuels et réels simultanément. En effet, lorsque les stimuli sont uniquement virtuels, il n'y a aucune différence entre les deux trajectoires d'essais en profondeur. Ceci indique que c'est le changement de contexte entre l'indice et la cible qui donne lieu à des effets de facilitation et d'IOR en profondeur et non uniquement le changement de position. Toutefois notre étude ne nous permet pas de déterminer si c'est le changement de contexte seul ou la trajectoire du changement de contexte qui détermine le sens de l'effet observé (i.e., facilitation ou IOR).

Nous observons des patterns de résultats différents selon le contexte d'affichage, suggérant des mécanismes d'orientation de l'attention visuelle différents lorsque l'attention porte sur des stimuli virtuels uniquement ou sur des stimuli virtuels et réels simultanément. Les résultats de cette étude sont à notre connaissance les premiers à pouvoir appuyer l'hypothèse selon laquelle les informations réelles et virtuelles en RA formeraient deux groupes perceptifs différents. En effet, si ces deux informations étaient traitées de la même manière, nous n'observerions pas de différence avec le traitement d'informations uniquement virtuelles. Or nous observons effectivement un pattern des temps de traitement différents pour les informations entre groupes (virtuel-réel) et pour les informations au sein d'un groupe (virtuel-virtuel). Néanmoins, notons qu'il existe une différence importante entre la condition virtuel-virtuel et virtuel-réel provenant principalement des conditions d'affichage et en particulier d'une différence de couleur et de luminosité. Il est donc possible que les résultats observés soient dus à ces différences. Cependant, rappelons que dans le cadre des études sur la ségrégation perceptive, ce sont les indices de couleur qui sont les caractéristiques permettant de distinguer les groupes perceptifs entre eux (Foyle et al., 1991). Les dispositifs de RA ne permettent pas à l'heure actuelle de proposer des affichages strictement équivalents au monde réel en termes de contraste, perspective, et luminosité. C'est pourquoi même si la problématique attentionnelle associée au changement de contexte est due à des différences de caractéristiques d'affichage, elle reste importante à considérer.

3.5.5 Conclusion

Les résultats de cette étude semblent indiquer que l'orientation de l'attention est sensible à la profondeur. Nous observons en RA, l'effet d'IOR horizontal classique ainsi qu'un effet d'IOR en profondeur pour certaines trajectoires des essais invalides. Cette étude montre que les mécanismes attentionnels ne semblent pas être influencés par le traitement d'informations virtuelles, mais davantage par le traitement simultané d'informations virtuelles et réelles. Cette étude est à notre connaissance la seule ayant évalué les mécanismes d'orientation de l'attention visuelle en ayant adapté le paradigme d'indication spatiale en RA. Afin d'apporter plus d'éléments de réponse aux résultats observés, il est nécessaire de réaliser d'autres études utilisant des paramètres expérimentaux plus

étendus, avec par exemple une version du paradigme utilisant des indices endogènes, ou encore utilisant une tâche de détection de cible et non de discrimination. En effet, l'effet de facilitation en 2D étant influencé par le type d'indice utilisé (i.e., périphérique ou central) (Maruff et al., 1999; Posner, 1980) il peut être intéressant d'étudier si ces variations de l'effet de facilitation sont également observées en 3D ou en RA.

Cette étude présente certaines limites, en effet, nous ne pouvons pas expliquer la présence d'un effet de facilitation avec un ISI aussi long. L'utilisation de différents niveaux d'ISI, permettrait d'étudier plus en détail les effets d'IOR, mais aussi de facilitation en profondeur en RA. Par ailleurs, notre étude ne nous permet pas de déterminer si c'est le changement de contexte seul ou le sens du changement de contexte qui détermine le sens de l'effet d'invalidité observé (i.e., facilitation ou IOR). Notre design expérimental pourrait ainsi être complété par l'ajout d'une variable concernant la position du plan en RA, avec une condition où le plan en RA est en avant (comme dans cette étude) et une où il est à l'arrière.

3.6 Conclusion générale

Le système visuel ayant des capacités de traitement de l'information limité, l'ajout d'information virtuelle inhérent à l'utilisation de la RA peut venir accroître le nombre d'information à traiter et donc impacter les ressources attentionnelles des utilisateurs. De nombreuses conséquences sur l'attention ont été identifiées dans la littérature (e.g., distraction cognitive, cécité attentionnelle, cognitive tunneling). Il semble ainsi que le traitement attentionnel supplémentaire associé au traitement d'informations virtuelles se fasse au détriment des informations réelles.

D'un point de vue industriel, ceci soulève la question de la sécurité des opérateurs et de leur capacité à pouvoir traiter des informations réelles pertinentes (e.g., alarme indiquant un danger) lors de l'utilisation de la RA. D'un point de vue scientifique, nous nous sommes intéressés à la question de la différence de traitement attentionnel entre les informations réelles et virtuelles et au coût potentiellement associé. Dans ce chapitre nous avons présenté deux études ayant pour but d'évaluer l'attention visuelle et plus particulièrement la détection d'événements inattendus en RA (Étude 3) et l'orientation visuo-spatiale de l'attention en RA (Étude 4).

Dans l'étude 3, nous avons observé que le context switching, i.e., le fait de passer d'information virtuelles à réelles pouvait dégrader les performances visuelles des participants non habitués aux jeux vidéo et nouvelles technologies. Ainsi la détection d'évènements inattendus pourrait être altérée lors de l'utilisation de la RA. Dans l'étude 4, nous avons montré que l'orientation de l'attention visuo-spatiale est sensible à la profondeur, y compris lorsque les stimuli sont virtuels présentés en RA. L'effet d'IOR observé dans cette étude montre que la détection d'une cible en RA est plus difficile après l'affichage d'un indice réel. Ceci implique qu'un utilisateur de RA peut détecter moins facilement des éléments virtuels projetés en RA après avoir perçu des éléments réels.

Par ailleurs, cette étude souligne plus particulièrement le fait que les mécanismes attentionnels semblent être influencés davantage par le traitement simultané d'informations virtuelles et réelles que par le traitement d'informations virtuelles seules. Prises ensemble ces deux études peuvent suggérer que le traitement des informations virtuelles est différent de celui des informations réelles. Ces résultats sont à notre connaissance les premiers à pouvoir appuyer l'hypothèse selon laquelle les informations réelles et virtuelles en RA formeraient deux groupes perceptifs différents et que le traitement simultané des deux est associé à un coût.

Ces deux études suggèrent donc que l'utilisation de la RA peut avoir des impacts négatifs sur les capacités attentionnelles des utilisateurs. Par ailleurs, bien que ces deux études présentent des limites, car elles sont peu écologiques, elles soulignent tout de même que l'utilisation de la RA peut avoir des conséquences cognitives et que son utilisation en milieu industriel doit se faire avec prudence. D'autres études sont nécessaires afin d'examiner les mécanismes attentionnels en RA et identifier si elle peut nuire à la santé des opérateurs lors d'utilisation régulière et prolongée.

Afin d'examiner plus largement les conséquences cognitives de la RA sur ses utilisateurs, nous allons dans le prochain chapitre évaluer les effets de la RA sur la charge mentale. Bien que d'autres études fondamentales restent nécessaires car les mécanismes cognitifs impliqués lors de l'utilisation de la RA ne sont pas encore exactement identifiés, il est cependant important d'évaluer les conséquences concrètes de l'utilisation de la RA directement en milieu industriel. Dans le chapitre suivant nous présentons donc une étude écologique et représentative directement réalisée sur les lignes de production d'elm.le-blanc.

RÉALITÉ AUGMENTÉE SUR UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE : EFFICACITÉ ET CHARGE MENTALE

L'objectif du projet IRON-MEN, est d'intégrer la RA au sein d'elm.leblanc, afin de mieux former les opérateurs dans les lignes d'assemblage et de production. Ceci implique le développement d'une application de RA pour l'accompagnement d'un nouvel opérateur lors de sa formation à l'assemblage d'un produit, ou pour la formation d'un opérateur expérimenté à l'assemblage d'un nouveau produit.

Les tâches d'assemblage consistent à manipuler des objets afin de construire un tout à l'aide d'instructions précises. Elles nécessitent donc que l'opérateur : synthétise des informations, telles que des séquences manuelles complexes et de longues données textuelles, puis identifie de façon précise des composants à utiliser, puis exécute la tâche sur une zone de travail définie. Classiquement, au sein d'elm.leblanc, la formation pour un nouvel opérateur est effectuée par des opérateurs experts de l'assemblage en question. Cependant ceci est coûteux en temps, en ressources et les instructions données peuvent différer d'un individu à un autre. De plus, les techniques actuellement utilisées pour présenter les instructions d'assemblage, telles que les manuels papiers ou les ordinateurs portables, ne permettent pas une intégration optimale des instructions à suivre dans la zone d'intérêt. Par conséquent, les informations pertinentes peuvent être visuellement séparées de la zone d'intérêt, i.e., la zone de travail manuel. Lorsque l'opérateur doit se référer à ce type de documentation, il détourne temporairement son attention de la zone d'intérêt réelle pour analyser des images et du texte décrivant cette zone de travail.

Anastassova et al., (2007) ont identifié certaines hypothèses qui ont été proposées concernant les avantages de la RA pour la formation et l'apprentissage de procédures. Ainsi, la RA proposerait de fournir un double support réel-virtuel et ainsi d'apprendre par l'action, en construisant des connaissances de manière active (Fjeld & Voegtli, 2002). La possibilité d'associer un objet physique à une notion abstraite permettrait une meilleure compréhension de certains concepts complexes (Stedmon & Stone, 2001). Par ailleurs, la RA fournit en temps réel des informations contextualisées, ce qui réduirait les risques d'erreur lors de session de formation (Neumann & Majoros, 1998). Enfin, elle peut accroître la motivation de l'utilisateur de par la nouveauté de son mode d'interaction (Zhong et al., 2003). En plus de laisser les mains libres à l'utilisateur, la RA autorise à la fois un apprentissage réalisé de manière autonome, mais également une mise en communication avec un expert de la tâche si l'utilisateur a besoin d'aide. En se basant sur ces données, la RA aurait le potentiel d'améliorer la formation des opérateurs dans la réalisation de tâche d'assemblage. Anastassova et al., (2007) soulignent cependant que les hypothèses évoquées manquent souvent de validations empiriques.

Dans le cadre du projet IRON-MEN, une application de visualisation des instructions d'assemblage a été développée pour la formation des opérateurs. Afin d'en évaluer l'efficacité et les effets cognitifs sur la charge mentale, nous proposons dans ce chapitre, une revue de la littérature sur l'évaluation de l'efficacité de la RA pour la réalisation de tâche d'assemblage, puis une revue sur la charge mentale et ses méthodes d'évaluation. Enfin nous présenterons une étude de terrain réalisée directement sur les lignes d'assemblage d'elm.leblanc.

4.1 La réalité augmentée pour l'assemblage industriel : quelle efficacité ?

La revue de la littérature présentée dans ce chapitre a été soumise pour publication dans la revue Le Travail humain.

La RA peut être utilisée pour la formation des opérateurs, mais également pour la production elle-même en développant la flexibilité au sein des usines et en renforçant la communication entre les équipes. Pour toutes ces raisons, son intégration dans les processus de fabrication industrielle est grandissante et de plus en plus d'entreprises cherchent à utiliser la RA directement sur les lignes de productions afin de former leurs opérateurs aux tâches d'assemblage industriel. L'intégration et l'utilisation dans le cadre du travail de ce type de dispositif posent cependant de nombreuses questions d'un point de vue technologique, industriel et utilisateur. L'utilisation de la RA pour l'affichage d'instructions de travail est un concept proposé la première fois par Caudell et Mizell (1992). Ils suggèrent alors que la superposition d'informations sur des objets du monde réel à l'aide d'un HUD, permettra de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité de nombreuses opérations humaines. L'utilisation d'instructions en RA pour la réalisation de tâches d'assemblage a depuis fait l'objet de très nombreuses publications scientifiques particulièrement sur la question de son efficacité sur les performances des utilisateurs.

L'objectif des prochains paragraphes est de faire le point sur les connaissances actuelles concernant l'utilisation de la RA pour la présentation d'instructions d'assemblage. Nous allons présenter une revue de 17 études ayant réalisé une évaluation de l'efficacité de la présentation d'instructions d'assemblage en RA. Les résultats et conclusions de ces études sont présentés, ainsi que les méthodologies d'évaluation utilisées. Enfin, nous exposerons les limites méthodologiques de ces études, qui laissent sans réponse consensuelle la question de l'efficacité de l'utilisation de la RA pour la formation à l'assemblage industriel.

Étant donné l'importante littérature existante sur le domaine de la RA, cette revue a été réalisée à partir d'articles sélectionnés selon plusieurs critères. Considérant la forte évolution des dispositifs de RA depuis les années 60, seules les études publiées à partir des années 2000 ont été analysées. Nous avons également décidé d'inclure uniquement les études utilisant des tâches d'assemblage, i.e., l'assemblage de composants pour former une structure globale, excluant ainsi les tâches d'*order-picking* (qui consiste à l'extraction d'un produit à une position donnée). Par ailleurs, les études ayant uniquement pour but le développement logiciel et l'intégration de prototype de guidage d'assemblage n'ont pas été incluses. Seules les études ayant mis en place une méthodologie expérimentale ayant pour but la comparaison entre la RA et un autre support de formation, s'appuyant sur une analyse statistique inférentielle des données ont été intégrées. Ainsi, nous avons identifié 17 études respectant ces critères, un tableau récapitulatif des études analysées est présenté dans la Table 8.

Table 8 - Récapitulatif des études sur l'efficacité de la réalité augmentée pour les tâches d'assemblages.

Études	Système RA utilisé	Supports instructions	Tâche d'assemblage	Sujets	Mesures	Résultats principaux
Blattgerste, Streng, Renner, Pfeiffer, & Essig (2017)	HDM de type Optical see-through: -Microsoft HoloLens -Epson Moverio BT-200	-Instructions "in-situ" : 1) Système de RA : Microsoft HoloLens 2) Smartphone -Instructions "In-view": 3) Système de RA Epson Moverio BT-200 4) Instructions papier	Assemblage de Lego® (32 étapes)	24 étudiants (16 hommes, 8 femmes) Sans expérience d'assemblage de Lego®	1) Temps de réalisation de l'assemblage (<i>General Assembly Task Model</i>) 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale perçue (NASA-TLX)	1) Temps de réalisation : Papier < Epson = HoloLens < Smartphone 2) Nombre d'erreurs : HoloLens = papier < Epson = Smartphone 3) Charge mentale : Papier < Epson < HoloLens = Smartphone
Bode (2019)	Prototype d'un système projectif	1) Système de RA: Augmented Reality Assisted Manufacturing (ARAM) 2) Instruction papier classique	Assemblage de vis	24 employés Sans expérience d'assemblage	Efficacité de l'assemblage 1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) Utilisabilité : <i>Think Aloud Technique</i> et <i>System Usability Scale</i>	1) Pas de donnée sur le temps de réalisation (en raison du nombre trop faible de réalisation terminée avec les instructions classiques). 2) Nombre d'erreurs plus faible en RA. 3) L'acceptabilité de la RA est meilleure que les instructions papier classiques.
Büttner, Prilla & Röcker (2020)	Prototype d'un système projectif (Projecteur Casio XJ-V110W)	1) Système de RA 2) Formation individuelle réalisée par un formateur 3) Manuel papier	Assemblage de composants pour pneumatiques (23 étapes)	24 participants (20 hommes, 4 femmes) Sans expérience	1) Nombre de cycles d'apprentissage 2) Temps de réalisation 3) Nombre d'erreurs 4) Questionnaire de connaissance : choix multiples basés sur des images	Après 2 jours 1) Nombre de cycles : Formateur < RA < papier 2) Temps de réalisation : Formateur < papier ; Formateur = RA ; RA = Papier 3) Erreurs : Formateur < RA ; Formateur < papier Après 7 jours 3) Erreurs :

						Formateur = RA = papier 4) Connaissances Formateur = RA = papier
Funk et al. (2017)	Prototype d'un système projectif : Détection des étapes de travail par caméra de profondeur (Kinect v2). Projection des informations directement dans la zone d'assemblage.	1) Système de RA in-situ 2) Sans instructions	Assemblage de composants sur une ligne de production de démarreurs pour voitures. (44 étapes)	6 opérateurs (6 hommes) 3 experts : avec 1 an d'expérience en assemblage de démarreurs 3 novices : avec expérience d'assemblage	1) Temps de réalisation de l'assemblage 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale perçue (NASA-TLX)	1) Temps de réalisation plus long en RA que sans les instructions, chez les experts et les novices 2) Aucune erreur chez les experts. Moins d'erreurs en RA, chez les novices. 3) Pas de différence de charge mentale entre les deux conditions, chez les experts comme les novices.
Funk, Kosch, & Schmidt (2016)	-HDM de type Optical see-through (Epson Moverio BT-200) -Prototype d'un système projectif : Détection des étapes de travail par caméra de profondeur (Kinect v2). Projection des informations directement dans la zone d'assemblage.	1) Système de RA HMD 2) Système RA projectif 3) Instruction par tablette 4) Instructions papier	Assemblage de Lego® Duplo (32 étapes)	16 étudiants (7 hommes, 9 femmes) Sans expérience en Lego®	1) Temps de réalisation de l'assemblage (<i>General Assembly Task Model</i>) 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale perçue (NASA-TLX)	Par rapport aux 3 autres types d'instructions : 1) Temps de réalisation plus long en RA HDM 2) Augmentation du nombre d'erreurs en RA HMD 3) Augmentation de la charge mentale en RA HMD
Gavish et al. (2015)	Système de RA tenu en main : plateforme mobile par tablette PC avec écran tactile	1) Système de RA : 2) Contrôle du système de RA : formation avec l'actionneur réel et l'aide d'une démonstration filmée une fois.	Assemblage d'une partie électronique d'une vanne motorisée (25 étapes)	40 techniciens (39 hommes, 1 femme) Au moins 3 ans d'expérience en tâche	1) Temps de formation 2) Nombre d'erreurs (résolues et non résolues) 3) Questionnaires subjectifs (Transfert d'apprentissage, utilisabilité)	Phase d'entraînement/ d'apprentissage : 1) Temps de formation plus long en RA que pour son contrôle Phase d'évaluation : 1) Temps de réalisation similaires en RA

		3) Système de RV : formation 4) Contrôle de la RV : regarder une démonstration filmée		de maintenance.		2) Erreurs résolues pas différentes en RA. Erreurs non résolues plus faibles en RA. 3) Questionnaire : RA significativement mieux notée que la RV
Haniff & Barber (2003)	Système de RA : Capture de scène par caméra et ajout d'images sur l'affichage. WART = Waterpump Augmented Reality Tool.	1) Système de RA 2) Instructions sur papier standard consistant en un dessin technique 2D.	Assemblage d'une pompe à eau réelle (8 composants)	10 étudiants (8 hommes, 2 femmes) Sans connaissance en RA et pompe à eau.	1) Temps de réalisation 2) Reports des verbalisations	1) Temps de réalisation plus lent pour RA que instructions papier 2) Les verbalisations des sujets décrivaient davantage les caractéristiques des pièces dans la condition papier que RA
Hou & Wang (2013)	Système de RA projectif : technologie d'enregistrement de marqueurs et une visualisation par un écran de projection.	1) Système de RA 2) Manuel en 3D en papier	Assemblage de Lego®	28 étudiants (14 hommes, 14 femmes) Novices dans l'assemblage, sans expérience en RA	1) Nombre d'essais d'assemblage jusqu'à ce que l'assemblage soit terminé sans erreur 2) Temps nécessaire pour mener à bien un essai 3) Nombre d'erreurs commises au cours d'un essai	2) Meilleur temps d'assemblage en RA 3) Moins d'erreurs en RA pour les hommes et les femmes Le manuel en 3D est plus efficace pour les hommes que pour les femmes.
Hou, Wang, Bernold, & Love (2013)	Hou, Wang, Bernold, & Love (2013)	Système de RA projectif : technologie d'enregistrement de marqueurs et une visualisation par un écran de projection.	1) Système de RA 2) Manuel en 3D en papier	Assemblage de Lego®	50 étudiants Novices dans l'assemblage, sans expérience en RA	1) Temps de réalisation de l'assemblage 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale perçue (NASA-TLX)
Hou, Wang, & Truijens (2015)	Système de RA projectif : technologie d'enregistrement de marqueurs et une visualisation par un écran de projection.	1) Système de RA 2) Dessins isométriques 2D sur papier	Tâches d'assemblage de tuyauterie à l'échelle réelle	20 étudiants Sans connaissance de la RA et des dessins isométriques	1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) Coût d'assemblage 4) Charge mentale (NASA-TLX)	1) Meilleur temps d'assemblage en RA 2) Réduction du nombre d'erreurs en RA 3) Réduction du coût de correction d'un assemblage erroné 4) Diminution de la charge mentale en RA

Loch, Quint, & Brishtel (2016)	Système de RA associant une caméra et un écran qui affiche le flux vidéo avec des animations superposées pour l'assistance.	1) Système de RA 2) Vidéos d'instruction	Assemblage de Lego (27 étapes)	17 étudiants Sans expérience en système d'assistance en RA	1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale NASA-TLX 4) Facilité d'utilisation perçue	1) Pas de différence significative pour le temps de réalisation en RA. 2) Moins d'erreurs en RA. 3) Pas de différence significative pour la charge mentale. 4) La facilité d'utilisation perçue a un effet significatif sur l'intention d'usage.
Min, Kwak, & Hwang (2020)	Système de RA tenu en main : sur smartphone mobile	1) Système RA 2) Instructions vidéo 3) Instructions papier	Assemblage de Lego®	30 étudiants (15 hommes, 15 femmes) 20% des participants avec expérience en RA	1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) <i>System usability Scale et Questionnaire du Technology Acceptance Model</i>	1) Temps de réalisation plus long avec RA 2) Nombre d'erreurs plus grand avec RA 3) L'utilisabilité de la RA est jugée plus faible que les vidéos, mais plus grande que le papier.
Tang, Owen, Biocca, & Mou (2003)	Système de RA avec un HDM de type vidéo see-through (Sony Glasstron LDI-100B) et un tracker des mouvements de tête.	1) Système de RA 2) Écran LCD 3) Instructions avec HMD sans RA 4) Manuel imprimé	Assemblage de Lego® Duplo (56 étapes)	75 étudiants (54 hommes, 21 femmes) Avec expérience en RA	1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) Charge mentale perçue : NASA-TLX	1) Temps de réalisation en RA similaire aux autres types d'instruction. 2) Nombre d'erreurs plus faible en RA 3) La charge mentale différente selon le type d'instructions
Webel et al. (2013)	Système de RA tenu en main : tablette mobile et bracelet haptique.	1) Système de RA 2) Vidéos d'instruction	Assemblage d'un actionneur électromécanique (25 étapes)	20 techniciens Avec au moins 2 ans d'expérience d'assemblage	1) Temps de réalisation 2) Le nombre d'erreurs non résolues 3) Le nombre d'erreurs résolues	1) Pas de différence de temps de réalisation similaire en RA 2) Nombre d'erreurs résolues similaires en RA Nombre d'erreurs non résolues plus faible en RA

Westerfeld, Mitrovic & Billinghamurst (2013)	HMD de type see-through (Wrap 920AR Vuzix couplé à une caméra)	1) Système de RA classique 2) Système de RA Intelligent (adaptatif)	Assemblage de composant d'une carte mère (18 étapes)	16 étudiants (11 hommes, 5 femmes) Sans expérience d'assemblage	1) Temps de réalisation 2) Nombre d'erreurs 3) Questionnaire sur l'utilisation du dispositif de RA	1) Temps de réalisation meilleur avec la RA intelligente. 2) Pas de différence pour le nombre d'erreurs
Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak (2003)	Système de RA hybride avec un écran tactile et un HDM : écran clipsable (MicroOptical) couplé à une caméra.	1) Système de RA 2) Tutoriel par un expert 3) Instructions papier	Assemblage : montage / démontage d'une portière de voiture (22 étapes)	36 apprentis et étudiants (36 hommes) Avec expérience pratique similaire en mécanique et en électronique.	1) Temps total d'assemblage 2) Temps pour chaque étape	1) Moins bon temps d'assemblage pour le support RA qu'avec l'expert. Meilleur temps de réalisation pour la RA que pour les instructions papier conventionnelles 2) L'efficacité du support en RA différerait selon les étapes. Le support RA est plus adapté que le manuel papier, pour les tâches difficiles, mais pas pour les plus faciles.
Yang et al. (2019)	Système de RA avec une caméra affichant le contenu sur un moniteur.	1) Système de RA 2) Instructions sur écran d'ordinateur	Assemblage de Lego® Duplo (9 étapes)	Étude 1 : 47 étudiants (21 hommes, 26 femmes) Étude 2 et 3 : 89 étudiants (42 hommes, 47 femmes)	Étude 1 : 1) Temps de réalisation de la tâche 2) Nombre d'erreurs 3) Charge cognitive (dimensions d'effort psychologique et de difficulté de la tâche). Étude 2 et 3 : 1) Temps de perception et sélection 2) Temps d'action 3) Nombre d'erreurs 4) Charge mentale (effort psychologique et difficulté de la tâche)	Étude 1 : 1) Temps de réalisation plus court avec RA 2) Réduction des erreurs en RA 3) Score d'effort psychologique et de difficulté de la tâche plus faible en RA Étude 2 et 3 : 1) Temps de perception et sélection plus court avec RA 2) Temps d'action plus court en RA 3) Réduction des erreurs en RA 4) Score d'effort psychologique et de difficulté de la tâche plus faible en RA

4.1.1 Évaluation de l'efficacité

L'analyse de ces études montre que l'efficacité de la RA est évaluée à partir de trois indicateurs : le temps de réalisation, les erreurs d'assemblage et la charge de travail. Dans les paragraphes suivants, nous décrirons les résultats observés et conclusions pour chacun de ces critères.

4.1.1.1 Le temps d'assemblage

L'indicateur le plus souvent étudié est le temps de réalisation nécessaire à l'assemblage (17 études sur 17). Il n'y a cependant pas de consensus sur la manière dont celui-ci varie avec l'utilisation des différents dispositifs de RA. En effet, certaines études démontrent un avantage de l'utilisation d'instruction en RA par un gain de temps dans la réalisation des tâches d'assemblage (5 études sur 17). Il a ainsi été observé que les utilisateurs effectuent des tâches d'assemblage manuel beaucoup plus rapidement à l'aide d'instructions affichées grâce à un dispositif projectif de RA, comparé à des instructions papier classiques (par ex. Hou et al., 2015, 2013; Hou & Wang, 2013; Yang et al., 2019).

Toutefois, dans de nombreuses études incluses dans notre analyse, l'utilisation de la RA n'entraîne pas de gain de temps (5 études sur 17), voire engendre des temps de réalisation plus longs (7 études sur 17). Ceci a été observé à la fois pour la comparaison classique aux instructions papier (Haniff & Baber, 2003; Min et al., 2020), mais également lors de la comparaison à d'autres types d'instructions telles que les vidéos (Loch et al., 2016; Min et al., 2020a), la RV (Gavish et al., 2015) et les tablettes (Funk et al., 2016). Enfin, la présentation d'instructions en RA projective ou en casque, entraîne également des temps d'assemblage plus longs que lorsqu'elles sont données par des experts de la tâche (Büttner et al., 2020; Wiedenmaier et al., 2003).

Certains chercheurs ont proposé que les avantages des instructions en RA dépendaient de la tâche ou de l'étape d'assemblage à réaliser, ceci pourrait expliquer les différences observées entre les études. Ainsi, les instructions en RA permettraient un meilleur temps d'exécution, uniquement lorsque la tâche en question est difficile. Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak (2003) ont testé cette hypothèse en utilisant une tâche d'assemblage de composants automobiles avec différents niveaux de complexité. Pour les tâches difficiles, les instructions en RA se sont avérées plus avantageuses que le manuel papier, tandis que pour les tâches plus faciles, l'utilisation d'un manuel papier ne différait pas de manière significative avec les instructions en RA. Dans cette étude, la RA ne présentait pas de bénéfice pour les tâches simples ou répétitives.

Funk, Kosch, Schmit (2016) ont souligné que chacune des études utilise sa propre tâche d'assemblage, ce qui les rend difficilement comparables, car chaque tâche possède une

complexité différente et des temps d'assemblage variables. Ils ont donc identifié quatre actions principales lors de tâches d'assemblage, c'est-à-dire *atteindre*, *saisir*, *déplacer* et *relâcher* et ont développé un modèle de tâche d'assemblage, le *General Assembly Task Model* (GATM) qui propose de diviser le temps total d'assemblage t_{total} en quatre sous parties (t_{locate_part} , t_{pick} , t_{locate_pos} , et $t_{assemble}$). Dans les études qui ont utilisé le GATM, les temps de réalisation observés en RA avec des casques transparents (par ex. Microsoft HoloLens, Epson Moverio), pour des tâches de complexité égale, sont au mieux équivalents aux autres types d'instructions (y compris papier), voire plus lents (Blattgerste et al., 2017b; Funk et al., 2016). Ceci montre l'importance de prendre en compte le niveau de complexité des tâches pour l'évaluation de l'efficacité de la présentation d'instructions en RA.

L'absence de bénéfice de la RA par rapport à d'autre support, peut en partie être expliquée par la nouveauté que représente cette technologie et le fait que la pratique des jeux vidéo et le niveau de familiarisation avec la RV et la RA influence les performances des utilisateurs (Étude 3). La formation par la RA pourrait donc devenir plus efficace dans les années à venir, avec une plus grande exposition de ce type de technologie auprès de la population générale ainsi que celle des opérateurs.

4.1.1.2 Les erreurs d'assemblage

Le second indicateur le plus étudié est le nombre d'erreurs d'assemblage (14 études sur 17). La réduction de ces erreurs lorsque l'assemblage est réalisé avec des instructions en RA, est l'avantage le plus souvent observé dans les études (10 sur 14). Ainsi, les utilisateurs effectuent des tâches d'assemblage avec moins d'erreurs à l'aide d'instructions affichées en RA projective comparées à des instructions papier classiques (Bode, 2019; Hou et al., 2015, 2013; Hou & Wang, 2013; Yang et al., 2019). Selon Tatić et Tešić (2017), qui ont également observé une diminution des erreurs dans le domaine de la maintenance, une des explications serait que l'utilisation de la RA empêche les utilisateurs de sauter des étapes ou de les compléter dans un ordre incorrect. En effet, certains systèmes de RA sont configurés pour reconnaître la réalisation correcte d'une étape avant de passer automatiquement à la suivante.

Bien que la plupart des études considèrent uniquement les erreurs totales réalisées au cours de l'ensemble de la tâche, certaines ont également analysé le type d'erreur et à quelle phase de l'assemblage apparaissent ces erreurs. Webel et al., (2013) ont ainsi fait la distinction entre les erreurs résolues et non résolues par les utilisateurs au cours de la tâche. Ils ont observé qu'en comparaison avec des instructions vidéo, le nombre d'erreurs résolues ne diffère pas avec les instructions en RA avec tablette, tandis que celui des erreurs non résolues est plus faible. Cet avantage de l'utilisation de la RA avec tablette

uniquement sur le nombre d'erreurs non résolues a également été observé par Gavish et al., (2015).

Blattgerste, Strenge, Renner, Pfeiffer, & Essig (2017) se sont basés sur le GATM pour distinguer différents types d'erreurs, en identifiant celles commises soit pendant toute la durée d'une tâche d'assemblage, soit pendant la phase de localisation de la pièce, de positionnement ou encore pendant l'assemblage des pièces. Dans cette étude, lorsque l'on compare les erreurs sur la totalité de la tâche et celles de localisation, c'est le mode d'instruction *in situ* en casque de RA (ici le Microsoft HoloLens) qui engendre le moins d'erreurs. Cependant, lorsque l'on considère les erreurs de placement, c'est le papier qui donne lieu à moins d'erreurs. Le fait de ne pas distinguer les différents moments et types d'erreurs pourrait ainsi expliquer pourquoi certaines études (5 études sur 17) n'ont pas montré une amélioration de la précision avec les instructions en casque de RA (Loch et al., 2016; Westerfield et al., 2015; Wiedenmaier et al., 2003), mais concluent à une augmentation générale des erreurs (Funk et al., 2016; Min et al., 2020).

4.1.1.3 La charge mentale de travail

Un autre indicateur d'efficacité de la RA, qui est cependant le moins étudié (8 sur 17), est son potentiel à réduire la charge mentale de l'utilisateur. En effet, contrairement aux instructions papier classiquement proposées, la RA permet de fournir des informations séquentielles au moment et à l'endroit où elles sont le plus nécessaires au lieu de forcer l'utilisateur à se rappeler les informations ou à les trouver dans les manuels d'instructions. Cependant, le faible niveau d'expérience et de familiarisation des utilisateurs avec les dispositifs de RA, pourrait engendrer un effort supplémentaire pour apprendre à utiliser ces derniers et donc entraîner une augmentation de la charge mentale par rapport à d'autres supports d'instructions.

Les résultats des études évaluant la charge mentale sont moins convergents que ceux concernant la réduction des erreurs. De façon similaire à ce qui est observé pour le temps de réalisation, on retrouve des études qui montrent que l'utilisation de la RA provoque, une diminution de la charge mentale (par ex. Hou & Wang, 2013; Yang et al., 2019), mais également une augmentation (Blattgerste et al., 2017b; Funk et al., 2016) ou encore aucun changement (Funk et al., 2017). Ces études utilisent presque toutes le NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), qui permet d'évaluer les différentes dimensions de la charge mentale de travail (mentale, physique, temporelle, performance, effort, frustration). Comme présenté dans le paragraphe 4.2.3.1, ce questionnaire est facile à utiliser et peu coûteux, il permet de distinguer la charge due à la tâche d'assemblage, de celle due au port du casque. Néanmoins, la plupart des études (6 sur 8) n'ont pas considéré chaque dimension et s'intéressent seulement au score global, ce qui peut expliquer les différences observées. Ces différences pourraient également, provenir du fait que le NASA-TLX est

une mesure subjective et auto-rapportée et qu'il peut être difficile pour les participants de mettre un chiffre sur une charge mentale perçue.

Par ailleurs, la charge mentale est à distinguer des indicateurs objectifs que sont le temps et les erreurs d'assemblage. A notre connaissance aucune étude approfondie de la charge mentale engendrée par la RA, associant plusieurs types de mesures (subjectives, objectives et comportementales) n'a pas encore été réalisée, ni en environnement de laboratoire, ni en milieu industriel.

4.1.2 Limites méthodologiques des études réalisées

L'analyse de la littérature des 20 dernières années a permis d'identifier les indicateurs actuellement utilisés pour évaluer l'efficacité des instructions d'assemblage en RA. Le nombre d'erreurs semble être un indicateur qui fournit des résultats consistants entre les études, tandis que le temps de réalisation et la charge cognitive donnent des résultats plus divergents. Bien qu'il existe pour ces trois indicateurs des variations entre les études, on observe une certaine consistance au sein des études qui ont utilisé les trois indicateurs. En effet, les études trouvant un bénéfice à l'utilisation de la RA, l'observent de manière cohérente sur les trois indicateurs, avec une amélioration des temps d'assemblage, une diminution des erreurs et de la charge mentale (Hou et al., 2015, 2013; Hou & Wang, 2013; Yang et al., 2019). De la même manière, les études observant un désavantage à l'utilisation de la RA, montrent de façon cohérente une augmentation du temps d'assemblage, ainsi que celle du nombre d'erreurs et de la charge mentale (Büttner et al., 2020; Funk et al., 2016; Min et al., 2020).

Ainsi ces résultats en apparence contradictoires pourraient être expliqués par une inconsistance dans les protocoles et méthodologies utilisées entre les différentes études. En effet, nous pouvons identifier quatre facteurs pour lesquels il y a des différences entre les études : la population étudiée, le type de tâches d'assemblage mises en place, le système de RA employé, ainsi que le fait d'évaluer le guidage ou l'apprentissage.

4.1.2.1 Population d'étude et type des tâches d'assemblage

Nous pouvons séparer les études analysées en fonction des différences méthodologiques concernant la population étudiée et la tâche d'assemblage utilisée. Les différents choix méthodologiques des études sont représentés dans la Table 9. De nombreuses études sont réalisées auprès d'une population d'étudiants, sans aucune expérience d'assemblage ou lien avec le domaine industriel, réalisant une tâche d'assemblage « factice », de type Lego®. Bien qu'elle soit peu représentative des conditions de lignes d'assemblage industriel, cette configuration est la plus fréquemment retrouvée (7 études sur 17). En comparaison, moins d'études ont été réalisées auprès d'une population plus représentative (4

études sur 17), telles que celles réalisées directement auprès d'opérateurs ayant de l'expérience dans l'assemblage, effectuant des tâches d'assemblage « réelles ». Bien que les choix méthodologiques de ces deux groupes d'études soient différents, des résultats globalement similaires peuvent être observés. Ainsi, de la même manière pour des participants, opérateurs avec une expérience d'assemblage, ou étudiants sans expérience, il ressort que l'utilisation de la RA est bénéfique pour la réduction des erreurs, mais pas nécessairement pour l'amélioration des temps d'assemblage (Gavish et al., 2015; Loch et al., 2016; Webel et al., 2013). Le fait que le niveau d'expertise en assemblage influence peu les résultats, peut être en lien avec le faible niveau de familiarisation des technologies de RA dans les deux populations. L'avantage de la RA sur les erreurs et non sur le temps d'assemblage est également observé lorsque l'on compare les tâches d'assemblage qu'elles soient factices ou réelles. Ceci peut être mis en lien avec les résultats de Wiedenmaier et al., (2003) selon lesquels il y aurait un gain de temps à l'utilisation de la RA uniquement pour les tâches d'assemblages complexes. C'est davantage le niveau de difficulté propre à l'assemblage à réaliser et non le fait qu'elle soit effectuée avec des composants réellement utilisés en milieu industriel qui influence l'avantage de la RA.

Table 9 - Choix méthodologiques des populations d'étude et du type d'assemblage en fonction des études.

Étude	Population d'étude				Type d'assemblage	
	Étu- diants	Opéra- teurs	Sans expérience	Avec expérience	Factice	Réel
Blattgerste, Strenge, Renner, Pfeiffer, & Essig (2017)	x		x		x	
Bode (2019)		x	x			x
Büttner, Prilla & Röcker (2020)	x		x		x	
Funk et al. (2017)		x	x	x		x
Funk, Kosch, & Schmidt (2016)	x		x		x	
Gavish et al. (2015)		x		x		x
Haniff & Baber (2003)	x		x			x
Hou & Wang (2013)	x		x		x	
Hou, Wang, Bernold, & Love (2013)	x		x		x	
Hou, Wang, & Truijens (2015)	x		x			x
Loch, Quint, & Brishtel (2016)	x		x		x	
Min, Kwak, & Hwang (2020)	x		x	x	x	
Tang, Owen, Biocca, & Mou (2003)	x			x	x	
Webel et al. (2013)		x		x		x
Westerfeld, Mitrovic & Billinghamst (2013)	x		x			x
Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak (2003)		x		x		x
Yang et al. (2019)	x				x	

4.1.2.2 Système de RA utilisé

Le choix du système de RA analysé varie également entre les études. En effet, pour presque chacune des études, un système de RA a spécifiquement été développé. Bien que les systèmes projectifs nécessitent généralement un dispositif couplant des marqueurs de position, une caméra de profondeur, ainsi qu'un projecteur, qui ne sont pas toujours facilement implantable au sein d'une ligne d'assemblage, la majorité des études a utilisé ce type de système. La plupart des études ayant utilisé les systèmes projectifs pour l'affichage d'instruction montrent un bénéfice de leur utilisation pour les erreurs d'assemblage (Bode, 2019; Funk et al., 2017), mais également pour le temps d'assemblage et la charge mentale (Hou et al., 2015, 2013; Hou & Wang, 2013). Les dispositifs tenus en main, tels que les tablettes et smartphones ont fait l'objet de moins d'étude, car ils ne permettent pas aux utilisateurs d'avoir les mains libres et les tâches d'assemblage sont réalisables moins facilement. Les deux études ayant évalué la présentation d'instruction en RA à l'aide d'une tablette, montrent que les temps d'assemblage ne sont pas meilleurs voire plus long qu'avec leur contrôle vidéo, mais elles montrent cependant que les erreurs non résolues sont plus faibles (Gavish et al., 2015; Webel et al., 2013). Bien que les systèmes transparents montés sur la tête permettent aux opérateurs de garder les mains libres sans nécessiter d'autres équipements, seules deux études ont été réalisées avec ce type de RA. Ces études ne montrent pas de bénéfices comparés aux instructions papier, puisque les systèmes transparents montés sur la tête entraînent des temps d'assemblage plus longs et une charge mentale plus importante (Blattgerste et al., 2017; Funk et al., 2016). Les différences observées entre les dispositifs de RA confirment donc que les contradictions apparentes sont liées à des différences dans les choix méthodologiques des études.

4.1.2.3 Utilisation de la RA : guidage ou apprentissage ?

Parmi les études analysées, la plupart (10 sur 17) ont comparé différents supports d'instruction comme guide lors de la réalisation d'une tâche d'assemblage, sans évaluer dans quelle mesure les participants pouvaient ensuite réaliser ce même assemblage sans l'aide des instructions. Les méthodologies utilisées dans ces études évaluent donc l'intérêt de la RA pour le guidage et la réalisation d'assemblage en cours d'utilisation et non pour l'apprentissage de ces assemblages après utilisation. Or la question de l'apprentissage semble être particulièrement pertinente dans le cadre de la formation en milieu industriel. En effet, dans le but de préserver la santé des opérateurs, l'intégration de la RA ne doit pas simplement être envisagée comme une solution de guidage qui nécessiterait un usage systématique de la RA à chaque assemblage, mais bien de former plus rapidement et efficacement à l'assemblage de sorte que la RA ne soit pas utilisée de manière trop prolongée.

Table 10 - Méthodologie utilisée dans les études sur l'apprentissage d'assemblage.

Études	Phase d'apprentissage	Phase d'évaluation
Büttner, Prilla & Röcker (2020)	Session 1 : répétition du cycle d'assemblage jusqu'à ce que le participant connaisse par cœur, avec l'aide d'instructions. Nombre de cycles non limité. Session 2 : 1 jour après Possibilité de réapprentissage avec instructions jusqu'à ce que plus d'erreurs	7 jours après : réalisation du cycle sans aide
Funk et al. (2017)	Pendant 3 jours avec instructions	Pendant 3 jours sans instructions
Gavish et al. (2015)	Rythme géré par le participant	Avec possibilité d'aide sur une étape spécifique
Hou & Wang (2013)	Apprentissage limité à un seul cycle d'assemblage, mais sans limite de temps	5 min après : réalisation, avec ou sans instructions, d'autant de cycle que nécessaire jusqu'à ce que plus d'erreurs
Hou, Wang, Bernold, & Love (2013)	Apprentissage limité à un seul cycle d'assemblage, mais sans limite de temps	5 min après : réalisation, avec ou sans instructions, d'autant de cycle que nécessaire jusqu'à ce que plus d'erreurs
Webel et al. (2013)	Le matin : apprentissage de l'assemblage avec instructions	L'après-midi : réalisation de l'assemblage avec possibilité d'avoir de l'aide
Westerfeld, Mitrovic & Billinghamurst (2013)	Apprentissage limité à un seul cycle d'assemblage	Immédiatement après, réalisation de l'assemblage sans instructions

Peu d'études (7 sur 17) ont évalué si l'utilisation de la RA permettait un apprentissage de procédure durable. Ces dernières ont ainsi évalué le transfert des connaissances entre des sessions d'apprentissage (ou de formation) avec différents supports et des sessions d'évaluation de ces apprentissages sans support. Cependant, l'analyse de ces études fait à nouveau émerger d'importantes différences méthodologiques. En effet, la manière dont sont mis en place et évalués les processus d'apprentissage en RA diffèrent grandement entre les études. D'importantes disparités sont observées, sur le délai d'apprentissage accordé aux participants, la possibilité de recevoir ou non de l'aide pendant la phase de test, ainsi que sur l'intervalle entre les phases d'apprentissage et de test. Ces différences dans les procédures expérimentales sont résumées dans la Table 10.

Selon les études, l'intervalle choisi entre les phases d'apprentissage et de test semble avoir une influence sur les résultats observés. En effet, lorsque la période entre la phase

d'apprentissage et la phase d'évaluation est courte (5min), les résultats montrent un bénéfice de l'utilisation de la RA sur les temps et les erreurs d'assemblage (Hou et al., 2013; Hou & Wang, 2013). Lorsque la période entre la phase d'apprentissage et la phase d'évaluation est légèrement allongée (le matin puis après-midi), le bénéfice pour le temps d'assemblage et les erreurs n'est plus observé, seul l'avantage pour les erreurs non résolues est toujours présent (Gavish et al., 2015; Weibel et al., 2013).

Une explication à ces résultats pourrait être que les bénéfices de la RA sont principalement des effets à court terme qui diminuent avec le temps. Ceci semble être confirmé par une étude ayant une phase d'évaluation de trois jours et dans laquelle il a toujours moins d'erreurs en RA, mais on note que les temps d'assemblage deviennent même plus longs (Funk et al., 2017). Enfin, l'étude ayant la phase d'évaluation la plus éloignée de la phase d'apprentissage, montre quant à elle qu'après sept jours, il n'y a plus de bénéfice de la RA sur le nombre d'erreurs, mais également sur la connaissance générale de l'assemblage (par ex : connaissance sur les positions ou orientations ou ordres des pièces). Notons que la majorité des études analyses des sessions d'utilisation courtes et non répétées, nous ne savons donc pas si les bénéfices de la RA qui sont ici à court terme pourraient être plus durables dans le cas d'utilisation prolongée. Ces résultats soulèvent donc la question de la stabilité des apprentissages qui sont réalisés avec la RA. Davantage d'études utilisant des périodes d'évaluation plus longues sont nécessaires afin d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation de la RA permet un apprentissage sur le long terme.

4.2 La charge mentale

Dans les paragraphes suivants, nous allons définir la charge mentale, mais également présenter les différentes méthodes d'évaluation qui sont proposées et utilisées dans la littérature. Dans le cadre de l'évaluation de l'utilisation de la RA comme outil de présentation d'instruction d'assemblage, la charge mentale a été jusqu'à présent uniquement considérée en tant qu'indicateur de l'efficacité, au même titre que des mesures de performances tels que le temps et les erreurs d'assemblage. L'objectif de ces paragraphes est également de souligner le fait que l'impact de la RA sur la charge mentale nécessite une évaluation plus approfondie que celle déjà réalisée dans la littérature.

4.2.1 Définition de la charge mentale et de la charge cognitive

La charge mentale est un concept pour lequel il n'existe toujours pas de définition universellement admise. La charge mentale a été fréquemment étudiée dans différents domaines, dont les deux principaux sont : la psychologie cognitive et l'ergonomie. En psychologie cognitive, le terme de charge mentale fait référence aux capacités limitées de

traitement de l'information (approche centrée sur l'individu) et se focalise plus principalement sur les déterminants cognitifs de la charge mentale (Chanquoy et al., 2007). En ergonomie la charge mentale dit charge mentale de travail (*mental workload*) fait référence aux exigences de la tâche de travail et aux stratégies adoptées par l'opérateur pour y répondre (approche centrée sur les caractéristiques de la tâche et l'expertise de l'opérateur) (Gopher & Donchin, 1986). La notion de charge mentale est un sujet d'étude complexe qui diffère selon les disciplines, ainsi, il a été difficile d'en obtenir une définition unique (voir Cain (2007) et Martin (2013) pour des revues de question). Parmi les nombreuses définitions qui ont été proposées, nous pouvons trouver :

- « La charge mentale de travail peut être vue comme la différence entre les capacités du système de traitement de l'information qui sont nécessaires à l'exécution d'une tâche pour satisfaire les attentes en matière de performance et la capacité disponible à un moment donné » (Gopher & Donchin, 1986, p.41-3).
- La charge mentale de travail résulte de « l'interaction entre les exigences d'une tâche, les circonstances dans lesquelles elle est exécutée et les compétences, les comportements et les perceptions de l'opérateur » (Hart & Staveland, 1988, p.140).
- La charge mentale de travail est « le résultat d'une interaction entre les exigences de la tâche et les caractéristiques humaines, c'est-à-dire que séparément, ni les propriétés de la tâche ni les caractéristiques de l'opérateur humain ne peuvent expliquer la charge de travail mentale » (Recarte et al., 2008, p.375).

Les différentes définitions proposées montrent que la charge mentale est sous la dépendance de trois éléments : les caractéristiques imposées par la tâche, les ressources mentales dont l'individu dispose pour la réalisation de cette tâche, ainsi que l'environnement dans lequel l'individu évolue.

Les termes charge cognitive et charge mentale sont souvent utilisés de façon interchangeable, cependant ils ne désignent pas le même objet. La charge cognitive représente les ressources cognitives nécessaires pour un individu pour réaliser une tâche (attention et mémoire à court terme). Cependant, d'autres facteurs peuvent affecter l'individu lors de la réalisation d'une tâche. La notion de charge mentale est donc une notion plus large et comprend également tous les facteurs qui ne font pas directement partie des ressources cognitives, tels que les ressources physiques, la vigilance, la motivation et les émotions. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons à la charge mentale, néanmoins la notion de charge cognitive étant centrale pour comprendre la charge mentale, nous allons dans les paragraphes suivants présenter la théorie de la charge cognitive.

4.2.2 Théorie de la charge cognitive

Sweller et ses collaborateurs ont proposé la « théorie de la charge cognitive » (*Cognitive load theory ; CLT*), qui modélise l'utilisation des ressources cognitives en situation d'apprentissage (Kalyuga et al., 1999; Sweller, 1988, 1994; Sweller et al., 1998, 2011).

La CLT s'intéresse à la fois à la présentation des informations, i.e., la situation d'apprentissage, mais également aux processus cognitifs mis en œuvre par l'apprenant dans ces situations. La CLT, a comme postulat de base, que les ressources cognitives sont limitées et qu'un apprenant à face une situation d'apprentissage nécessitant plus que les ressources qui lui sont disponibles, présentera un apprentissage limité. Les ressources cognitives à disposition d'un apprenant sont l'attention (voir paragraphe 3.2) et la mémoire de travail (MDT). La MDT permet de stocker et de manipuler des informations pendant un temps donné (Baddeley, 1992; Baddeley & Hitch, 1974). Dans le cadre de la CLT, l'apprentissage de connaissances nécessite une réorganisation des connaissances qui sont maintenues actives en MDT.

Selon la CLT, les ressources cognitives d'un apprenant sont partagées entre différentes sources de charges cognitives imposées par la tâche. On distingue trois sources de charges cognitives qui renvoient à des relations différentes entre l'apprenant, les connaissances à apprendre et la situation d'apprentissage : la charge intrinsèque, la charge extrinsèque et la charge utile. Ces trois types de charges partagent les mêmes ressources en MDT, ainsi lorsque les différentes ressources nécessaires dépassent la capacité de MDT, l'apprentissage à une efficacité diminuée.

La charge intrinsèque (*intrinsic cognitive load*)

Elle correspond à la charge imposée par les caractéristiques de la tâche à apprendre. Ce sont les éléments à apprendre ainsi que les liens entre ces éléments à maintenir actifs en MDT afin de pouvoir réaliser la tâche en cours. Cette charge inhérente à la tâche, est donc déterminée par le nombre d'éléments en interaction qui doivent être traités simultanément. En diminuant la difficulté de la tâche, la charge intrinsèque peut être réduite et ainsi libérer des ressources pour l'apprentissage.

La charge extrinsèque (*extraneous cognitive load*)

Elle désigne tous les éléments présents dans la situation d'apprentissage qui ne sont pas directement nécessaires à l'apprentissage. Ces éléments correspondent aux aspects de présentation de l'information à apprendre. Ainsi, en présentant l'information de la manière la plus simple et optimale possible, le nombre d'éléments à maintenir actif en MDT diminue et la charge extrinsèque est réduite.

La charge cognitive intrinsèque et extrinsèque reposent sur les mêmes ressources cognitives de l'apprenant, il y a donc compétition entre les deux types de charges pour les ressources en MDT. Si l'apprenant doit maintenir actives les informations nécessaires à la réalisation de la tâche en cours, ainsi que celles non pertinentes, alors les ressources disponibles pour la charge intrinsèque sont diminuées. La diminution de la charge extrinsèque se fait ainsi au bénéfice de la charge intrinsèque et donc de l'apprentissage.

La charge utile (*germane cognitive load*)

Elle désigne le transfert d'informations de la MDT à la mémoire à long terme, i.e., l'apprentissage en lui-même. Ce transfert nécessite également des ressources en MDT. Selon la théorie de la charge cognitive, les ressources cognitives sont en premier lieu partagées entre la charge intrinsèque et extrinsèque, puis s'il reste des ressources disponibles, alors celles-ci peuvent être dédiées à la charge utile, permettant le passage en mémoire à long terme et l'apprentissage.

4.2.3 Méthodes de mesures de la charge mentale

Nous allons dans les prochains paragraphes présenter et détailler les avantages et inconvénients des trois principales catégories de mesures de la charge mentale : subjectives, physiologiques et comportementales (voir Boyer (2017), Miller (2001) et Cain (2007) pour une revue). Ces mesures souvent utilisées seules, peuvent également être utilisées de façon combinée (Cegarra & Chevalier, 2008) pour étudier la charge mentale.

4.2.3.1 Méthodes subjectives

Les mesures subjectives de la charge mentale reposent sur une approche introspective dans laquelle le participant est amené à fournir un jugement sur la charge mentale demandée par la tâche qu'il vient de réaliser. Ce sont principalement des mesures d'auto-évaluation par questionnaire. De nombreuses échelles ont été développées, telles que des échelles unidimensionnelles, e.g., l'échelle de Cooper-Harper (Cooper & Harper, 1969), l'échelle de Cooper-Harper modifiée (Wierwille & Casali, 1983) ou multidimensionnelles, e.g., le NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), la *Subjective Workload Assessment Technique* (Reid & Nygren, 1988).

La limite majeure de ces mesures subjectives est qu'elles reposent sur le postulat selon lequel les participants sont capables de rendre compte avec précision de leur niveau de charge mentale. La seconde limite mise en avant dans la littérature est que les mesures subjectives sont statiques et non dynamiques. En effet, elles ne sont pas administrées au cours de l'exécution de la tâche, mais avant ou après. Elles ne permettent donc pas

d'explorer les variations continues de charge mentale pendant la tâche (Yeh & Wickens, 1988). Cependant les mesures subjectives présentent l'avantage d'être peu coûteuses et non intrusives pour le participant, elles ne gênent pas la réalisation de la tâche en cours et sont donc facilement implémentables.

Parmi toutes les échelles proposées, la NASA-TLX est une des plus utilisées, elle est considérée comme celle proposant la mesure la plus sensible et fiable (Hill et al., 1992). Elle repose sur six dimensions, dont les traductions françaises ont été développées par Cegarra et Morgado (2009) : exigence mentale, physique, temporelle, performance, effort, frustration. Le participant évalue la charge mentale sur ces six dimensions en utilisant un score allant de 0 à 100, puis dans un second temps, le participant pondère ces scores en fonction de la dimension qui a le plus contribué à sa charge mentale. Cette pondération permet de fournir une information sur la source de la charge et d'en tenir compte dans le score final de la charge mentale. Cependant, cette seconde étape de pondération étant coûteuse en temps, une modification a donc été proposée, le Raw Task Load Index (RTLX; Byers et al., 1989), dans lequel seul le score global des six dimensions est calculé. Le score de cette version modifiée est fortement corrélé au score obtenu avec le calcul classique.

4.2.3.2 Méthodes physiologiques

Les différentes mesures physiologiques de la charge mentale sont basées sur l'hypothèse que les changements des fonctions cognitives donnent lieu à des variations physiologiques (pour une revue voir Charles & Nixon, 2019; Tao et al., 2019). Elles consistent donc à recueillir les réactions physiologiques d'un individu afin d'obtenir une mesure objective de sa charge mentale.

Selon Miller (2001) les mesures physiologiques utilisées pour la mesure de la charge mentale concernent cinq activités physiologiques différentes : cardiaque, respiratoire, orale, cérébrale et oculaire. De manière générale les mesures physiologiques présentent des intérêts et limites communs. En effet, elles présentent l'avantage majeur de pouvoir être acquises en continu et donc de refléter le niveau de charge mentale d'un individu en temps réel. Cependant ces mesures ne sont pas sensibles uniquement à la charge mentale, mais également à d'autres facteurs : physiologiques (e.g., stress, consommation de stupéfiants, fatigue), psychologiques (e.g., anxiété, émotions) et environnementaux (e.g., température, humidité, luminosité) (de Waard, 1996; Peinkhofer et al., 2019). L'utilisation de mesures physiologiques demande donc souvent des environnements de test très contrôlés, et nécessite de vérifier que les participants n'ont pas consommé précédemment : alcool, caféine, cigarette ou drogues.

Parmi les mesures physiologiques, les mesures orales sont très peu utilisées de par la difficulté de réaliser des mesures précises sur les différents aspects de la parole (e.g.,

hauteur, cadence, volume), il existe donc peu de données vérifiées sur le sens de variation de ces mesures avec la charge mentale. Les mesures cardiaques (e.g., fréquence cardiaque, pression sanguine) et respiratoires (e.g., fréquence respiratoire) ont souvent été utilisées pour mesurer la charge mentale (Guo et al., 2017, 2016; Lo et al., 2017). Bien qu'elles permettent des mesures dynamiques et non invasives, elles nécessitent généralement l'utilisation de capteurs et d'électrodes qui peuvent gêner la réalisation de la tâche en cours. Bien que les mesures cérébrales (e.g., électroencéphalographie, imagerie par résonance magnétique fonctionnelle) soient souvent utilisées (Hogervorst et al., 2014; Midha et al., 2021), elles requièrent des équipements très spécifiques et intrusifs dont les coûts sont importants (finances, personnels, analyses des données).

Les mesures oculaires (e.g., diamètre pupillaire, mouvements oculaires) sont également fréquemment retrouvées dans la littérature (Coyne & Sibley, 2016; Faure et al., 2016; Foy & Chapman, 2018; Martin et al., 2011), car elles sont très sensibles aux variations de charge mentale et en particulier à la charge visuelle (Brookings et al., 1996; Orden et al., 2001). Les dispositifs nécessaires (oculomètres) ne sont pas invasifs pour le participant et peuvent s'adapter à différents environnements d'étude. Certains dispositifs mobiles et sans fil sont peu coûteux et permettent de ne pas gêner la réalisation de la tâche en cours. Les mesures oculaires présentent donc un rapport avantage/inconvénient qui en fait une des mesures physiologiques les plus pertinentes à l'étude de la charge mentale. Nous allons donc détailler plus précisément ces différentes mesures oculaires qui sont celles utilisées dans ce travail de thèse.

Concernant les mesures oculaires on retrouve de façon fréquente, l'étude des mouvements oculaires volontaires comme les fixations (Recarte & Nunes, 2000) et les saccades (Serman & Mann, 1995), les trajectoires d'exploration (Paubel et al., 2013), ainsi que les mécanismes oculaires involontaires comme la fréquence des clignements (Recarte et al., 2008; Stern et al., 1984) et la dilatation pupillaire (Beatty, 1982; Marshall, 2002). Bien que certaines études montrent des résultats contradictoires sur le sens de variation de ses mesures, il ressort tout de même un consensus sur l'utilisation de l'oculomètre comme outil d'évaluation de la charge mentale.

Les fixations et saccades oculaires

De nombreux paramètres caractérisant les fixations oculaires ont été utilisés pour l'étude de la charge mentale, tels que le nombre de fixations, la durée de la fixation, le nombre de saccades, l'amplitude des saccades et la distribution du regard. La durée des fixations oculaires augmente avec la demande visuelle et mentale de la tâche (Daniel & Kapoula, 2019; Recarte & Nunes, 2000). De façon cohérente, on retrouve des données indiquant que lorsque la charge mentale augmente, la durée et distance des saccades

diminue (Maltz & Shinar, 1999; May et al., 1990; Paubel et al., 2013; Stein, 1992) et leur rapidité augmente (Di Stasi et al., 2010). Cependant, notons que certaines études observent des données contradictoires, avec une augmentation du nombre de saccades (Zagermann et al., 2018), ainsi qu'une diminution de leur vitesse (Chen et al., 2011).

Le pattern d'exploration visuelle d'une scène a également été utilisé comme indicateur de la charge mentale, en effet l'exploration visuelle d'un individu est modifiée par la demande de la tâche, de sorte que lorsque la charge mentale augmente, les fixations sont davantage concentrées et restreintes à certaines parties de la scène visuelle (Miura, 1990; Paubel et al., 2013; Tole et al., 1982).

Les clignements oculaires (*blinks*)

De nombreuses études ont utilisé les clignements oculaires comme indicateurs de la charge mentale en étudiant leur taux, durée et latence (voir Marquart et al., (2015) pour une revue). Les études utilisant la variation du taux de clignement comme indicateur de la charge cognitive présentent également des données contradictoires. En effet, certaines études montrent que le nombre de clignements diminue avec l'augmentation de la charge (Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006; Brookings et al., 1996; Cain, 2007; Stein, 1992). Tandis que d'autres études ont observé une augmentation du nombre et de la durée des clignements avec la charge mentale (Benedetto et al., 2011; Faure et al., 2016; Merat et al., 2012; Recarte et al., 2008b).

La pupillométrie

Comme présenté précédemment, la charge mentale dépend des ressources disponibles en MDT. Le diamètre pupillaire augmentant avec la difficulté des traitements cognitifs à effectuer en MDT (Beatty, 1982), il est un indicateur de la charge mentale. De nombreuses données de la littérature montrent de façon consensuelle que le diamètre pupillaire augmente avec la charge mentale (Alnæs et al., 2014; Bednarik et al., 2018; Duchowski et al., 2018; Foroughi et al., 2017; Klingner et al., 2011; Recarte & Nunes, 2003; Zagermann et al., 2018), voir Peinkhofer et al., (2019) pour une revue sur l'étude de l'activité pupillaire.

En complément du diamètre brut, plusieurs indicateurs dérivés du diamètre pupille ont été proposés dans la littérature : e.g., la réponse pupillaire provoquée par la tâche (*task-evoked pupillary response*; Granholm et al., 1996), l'indice de l'activité pupillaire (*index of cognitive activity*, Marshall, 2002b), le pourcentage de changement du diamètre de la pupille (*percentage of change of pupil diameter*; Kruger & Steyn, 2014).

4.2.3.3 Méthodes comportementales

Comme détaillé précédemment (paragraphe 4.2.1), la notion de charge mentale fait référence aux exigences de la tâche et aux ressources disponibles par l'individu. Si les ressources demandées par la tâche deviennent trop importantes, les performances de réalisation de cette tâche diminuent. Les mesures dites comportementales correspondent à une évaluation directe de la charge mentale, car elle repose sur les effets qu'elle engendre, i.e., le niveau de performance atteint par l'individu. Les mesures comportementales de la charge mentale ont été réalisées en évaluant les performances sur la tâche principale (de Waard, 1996; Hicks & Wierwille, 1979) ou sur une tâche supplémentaire réalisée simultanément (de Waard, 1996; Kellogg, 1990; Piolat et al., 1999).

Dans le premier cas, la réussite à la tâche principale est un indicateur de la charge mentale. Les variables mesurées pour quantifier le niveau de performance atteint sont généralement le temps de réalisation et la présence d'erreurs (Brangier & Barcenilla, 2003). Or, la charge mentale ne dépend pas seulement des exigences de la tâche, mais également d'autres facteurs tels que la motivation, les stratégies cognitives, et les différences inter-individuelles (Cegarra & Chevalier, 2008). Il est ainsi possible que deux individus expérimentent des niveaux différents de charge mentale, mais présentent un même niveau de performance en raison du niveau d'expertise ou des stratégies mises en place. Par ailleurs, il a été montré qu'il peut être difficile d'observer une modification de la performance sur la tâche principale si le niveau de charge mentale augmente, mais qu'il n'excède pas les capacités de l'individu (Raufaste et al., 2004).

Afin de faire face à ces limites, les mesures comportementales peuvent être réalisées avec l'introduction d'une tâche secondaire à réaliser simultanément avec la principale. Dans ce cas-là ce sont les performances à la tâche secondaire qui permettent d'établir le degré de charge mentale engendrée par la tâche principale. En effet, les ressources disponibles et non déjà utilisées pour la réalisation la tâche principale, vont théoriquement être allouées à la réalisation de la tâche additionnelle (Wickens et al., 1998). Selon Cain (2007), les mesures de performances des tâches secondaires fournissent un indice de la capacité restante de l'opérateur lors de l'exécution des tâches primaires et sont plus diagnostiques que les mesures des tâches primaires seules.

Les mesures de performances de la tâche additionnelle reposent sur le paradigme de double tâche (*dual task paradigm*, déjà utilisé dans l'étude 3). Le paradigme de la double tâche consiste à demander à des participants de réaliser une tâche principale (i.e., celle sur laquelle le participant met la priorité) et de réaliser simultanément une tâche secondaire, dans laquelle ils doivent détecter le plus rapidement possible des cibles visuelles ou auditives qui ont une faible probabilité d'apparition. Ainsi, comme le participant privilégie la tâche principale, les effets de la charge mentale seront observés par une diminution des performances de la seconde tâche.

Cain (2007) a identifié dans sa revue les principales caractéristiques des tâches secondaires à utiliser pour l'étude de la charge mentale : pas d'interférence avec la tâche principale, facile à apprendre, autonome (peut être interrompu ou retardé). Il a également listé les variables typiquement mesurées pour les tâches secondaires : temps de réaction, précision, taux de détection du signal, pourcentage du temps occupé.

Les mesures comportementales permettent d'obtenir des données quantitatives du niveau de charge mentale, ainsi qu'une mesure continue au cours de la tâche. Néanmoins, elles présentent des limites, dont la principale est le fait que l'utilisation d'une tâche secondaire peut ajouter elle-même un certain niveau de charge mentale supplémentaire à la tâche principale (Colle & Reid, 1999; Sirevaag et al., 1993). Tout comme pour les mesures sur les tâches principales, la mesure sur les tâches secondaires ne permet pas de prendre en compte les variations du niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur dû au niveau d'expertise, de motivation, d'émotions pouvant varier au cours de la réalisation des tâches. Enfin, le paradigme de double tâche n'est pas très écologique et la méthodologie requise peut inclure des conditions ne correspondant pas à des situations de travail habituelles (notamment dans le cadre industriel).

4.3 Problématique

Bien que l'efficacité de la présentation d'instructions d'assemblage en RA ait fait l'objet de nombreuses publications depuis les années 90, les données actuelles ne nous permettent pas de dire si l'utilisation de la RA donne lieu à une meilleure formation à l'assemblage et donc constitue un outil d'apprentissage plus efficace que ceux déjà utilisés actuellement. Les études réalisées sont souvent peu représentatives des conditions réelles des lignes d'assemblage et la charge mentale est évaluée par une mesure subjective unique.

Le but de cette dernière étude est donc d'évaluer l'efficacité, mais également la charge mentale de la RA comme support de présentation d'instruction d'assemblage. Afin de répondre aux lacunes identifiées dans la littérature, cette étude se fera directement en milieu industriel avec des employés de l'usine, sur les postes d'assemblage de l'usine d'elm.leblanc. La charge mentale sera envisagée comme un processus cognitif complexe nécessitant une évaluation plus approfondie que celle réalisée classiquement dans les études sur l'assemblage : par l'utilisation de trois types de mesures différentes et complémentaires (objectives, subjectives, comportementales).

L'objectif de cette étude est d'identifier si une application de RA développée dans le cadre du projet IRON-MEN permet aux opérateurs d'être plus efficaces, en réalisant l'assemblage de composants plus rapidement et avec moins d'erreurs comparé à un autre support d'instructions. Elle aura également comme objectif de déterminer si la RA permet de réduire la charge mentale des opérateurs, ou au contraire si elle l'augmente.

4.4 Etude 5 - Utilisation de la RA sur une ligne d'assemblage : Évaluation de l'efficacité et de la charge mentale

Cette étude a été soumise pour publication dans la revue Applied Ergonomics.

Comme présenté dans les paragraphes précédents (paragraphe 4.1), bien que l'utilisation de la RA pour le guidage et l'apprentissage des tâches d'assemblage ait fait l'objet de nombreuses études, les résultats de ces dernières ne nous permettent pas de répondre pleinement à la question de l'efficacité de la RA lorsqu'elle est directement intégrée sur une ligne d'assemblage. En effet, les études sur l'efficacité de la RA pour les tâches d'assemblage ont rarement été réalisées directement en milieu industriel, mais plutôt en laboratoire avec tâches d'assemblage factices.

Dans le cadre du projet IRON-MEN, un des objectifs finaux est l'intégration effective de la solution de RA développée au sein des lignes de l'usine elm.leblanc. Dans ce but, il est nécessaire d'évaluer les effets de la RA sur les opérateurs directement sur les lignes d'assemblage. Cette étude propose d'évaluer l'utilisation de la RA pour l'assemblage en utilisant les indicateurs d'efficacité utilisés dans la littérature (e.g., temps d'assemblage et nombre d'erreurs), mais également en approfondissant la question de la charge mentale.

Peu d'études ont évalué la charge mentale dans les études sur l'assemblage et la plupart à l'aide d'un seul et même questionnaire, i.e., le NASA-TLX. Cette échelle est une des plus utilisées, car elle est une des plus sensible et fiable (Hill et al., 1992), mais comme toutes mesures subjectives elle présente des limites (voir paragraphe 4.2.3.1). De par la multi-dimensionnalité de la charge mentale, de nombreux auteurs ont choisi de la mesurer avec un ensemble de mesures plutôt qu'avec une mesure unique (Bednarik et al., 2018; Jafari et al., 2020; Luque-Casado et al., 2016; Wanyan et al., 2014)

Les résultats de certaines études suggèrent que les trois types de mesures ne vont pas nécessairement dans le même sens, notamment la mesure subjective du NASA-TLX. Dans une récente étude (Jafari et al., 2020), les mesures comportementales et physiologiques ont montré des données cohérentes avec le niveau de charge mentale et seulement avec la dimension mentale du NASA-TLX. Jafari et al., (2020) ont mis en évidence que selon les études, la ou les dimensions du NASA-TLX liées à la variation de la charge mentale ne sont pas toujours les mêmes. Une différence importante a également été retrouvée entre la mesure de la fréquence cardiaque et celle du NASA-TLX (Luque-Casado et al., 2016).

Selon Miyake (2001), une explication à ces différences entre les mesures subjectives et physiologiques, correspond au fait que les mesures subjectives de la charge mentale sont réalisées seulement après la fin de la tâche et peuvent ainsi être influencées par des

événements en fin de tâche (e.g., réussite finale de la tâche ou non), tandis que les mesures physiologiques enregistrées pendant toute la durée de la tâche ne le sont pas.

Bien que présentant des avantages certains pour l'étude de la charge mentale, les limites observées pour le NASA-TLX montrent que cette échelle n'est pas suffisante et que l'utiliser en combinaison d'autres mesures, permettrait d'obtenir plus d'éléments de réponse sur l'impact de la RA. Les différentes méthodes de mesures de la charge mentale, peuvent être distinguées entre elles par leurs exigences techniques ainsi que par la quantité et la qualité des données obtenues (voir Cegarra & Chevalier (2008) pour une revue complète). Cegarra et Chevalier (2008) montrent dans cette revue les avantages de la combinaison des mesures physiologiques, comportementales et subjectives de la charge mentale afin de compenser les différentes limitations propres à chaque mesure. En tenant compte des avantages et limites de chacune des mesures, ainsi que de leur faisabilité en milieu industriel, nous avons sélectionné une mesure de chaque catégorie : les mesures oculaires, le paradigme de la double tâche et le NASA-TLX. Bien que nécessitant un environnement contrôlé, les mesures oculaires (clignements oculaires et taille de la pupille) permettent une mesure dynamique de la charge mentale. Les eye tracker permettant de réaliser ces mesures sont de moins en moins coûteux et intrusifs, par ailleurs ils commencent à être directement intégrés aux dispositifs de RA ou RV, ce qui en fait un des outils de mesure de la charge mentale en RA les plus pertinents. Le paradigme de la double tâche permet également une mesure dynamique et est simple à administrer, ce qui permet de l'implanter facilement en milieu industriel. Enfin, le NASA-TLX présente le moins d'exigences techniques et n'est pas intrusif, il est facilement administrable et évalue plusieurs dimensions de la charge mentale.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer si l'utilisation de la RA pour la présentation d'instructions d'assemblage présente un bénéfice en termes d'amélioration de l'efficacité et de réduction de la charge mentale. Dans ce but nous avons donc comparé l'efficacité des performances d'assemblage et la charge mentale associées à l'utilisation d'instructions en RA, à celles associées à des instructions sur ordinateur. Nous avons également comparé un poste d'assemblage simple et complexe afin de déterminer si l'avantage de la RA uniquement pour les tâches complexes est retrouvé pour des tâches d'assemblage industrielles. Si la contextualisation et spatialisation des informations en RA, permet de réduire les mouvements de tête et d'éliminer l'ambiguïté de la localisation des composants, cela devrait permettre de réduire le temps d'assemblage global et le nombre d'erreurs. Par ailleurs, si la RA permet une intégration optimale des informations dans la zone d'intérêt et que par conséquent l'opérateur n'a pas besoin de maintenir en mémoire ces informations, ceci pourrait réduire la charge mentale.

4.4.1 Méthode

4.4.1.1 Participants

Vingt-sept employés de l'usine d'elm.leblanc (5 femmes, 22 hommes) ont été recrutés pour cette étude, parmi un large éventail de niveau d'éducation (du CAP au doctorat) et de postes (e.g., apprentis, responsables d'équipes, managers, directeurs). Les participants incluent étaient âgés de 24 à 63 ans ($M=35.88$; $ET=12.67$) et ont utilisé leur correction optique habituelle (lunettes, lentilles). Parmi les participants, trois employés ont rapporté avoir une expérience d'assemblage manuelle, cependant aucun n'avait d'expérience ou de connaissances des postes d'assemblage testés dans cette étude. 17 participants ont déclaré avoir utilisé au moins une fois un casque de RV et 15 un casque de RA. Avant de participer, tous les volontaires ont été pleinement informés de la procédure expérimentale et ont signé un formulaire de consentement éclairé. L'étude a été menée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki.

4.4.1.2 Design expérimental

Dans cette étude, deux facteurs intra-sujet ont été manipulés : le type de support de présentation des instructions d'assemblage (RA, Ordinateur) et la complexité du poste d'assemblage (Complexe, Simple).

Dans la condition *RA* les instructions ont été présentées dans le casque de RA (Microsoft HoloLens 2). Dans la condition *Ordinateur*, les mêmes instructions ont été présentées en utilisant des diapositives PowerPoint sur un ordinateur. Pour assurer l'équivalence entre les conditions (i.e., poids du casque), le casque de RA était porté par les participants dans les deux conditions.

Dans la condition *Complexe*, le poste d'assemblage (poste 101.1) nécessitait 33 instructions de complexité moyenne, telles que des opérations de vissage et de rotation. Dans la condition *Simple*, le poste d'assemblage (poste 101.2) nécessitait 13 instructions de complexité faible telle que du positionnement. Les instructions détaillées des deux postes sont disponibles en Annexe 6.

La combinaison de ces deux facteurs, permet d'obtenir quatre conditions expérimentales différentes, chaque participant a réalisé deux des quatre conditions expérimentales (e.g., RA complexe et Ordinateur Simple). L'ordre de présentation des quatre conditions entre les participants a été contrebalancé en utilisant un carré latin équilibré.

4.4.1.3 Matériel et stimuli

Logiciels et dispositifs

HoloLens 2 a été utilisé pour afficher les instructions d'assemblages dans la condition RA. Unity 3D et MRTK ont été choisis pour réaliser l'outil de création et de visualisation des instructions d'assemblage (voir Lavric et al., (2021) pour une description complète

de la méthodologie du développement). Un ordinateur Fujitsu 15.6 pouces a été utilisé pour afficher les instructions d'assemblage dans la condition ordinateur. Le logiciel psychoPy a permis de générer les stimuli sonores de manière aléatoire toutes les 15 à 25 secondes. Le logiciel WavePad a permis d'enregistrer et d'analyser les réponses orales des participants. L'eye tracker Pupil Labs et le logiciel PupilCapture ont servi à l'enregistrement des données oculaires des participants, et le logiciel PupilPlayer à l'analyse et l'extraction des informations (Kassner et al., 2014). L'eye tracker Pupil Labs a été intégré directement sur l'HoloLens 2 à l'aide de pièces imprimées en 3D (voir Figure 40).



Figure 40 - Photographie des deux caméras de l'eye tracker Pupil Labs intégrées au Microsoft HoloLens 2.

Description des postes d'assemblage

Les postes d'assemblage évalués sont les deux premiers de la ligne 1, ils ont pour objectif de former la structure de base de la chaudière *Egalis Condens*. Dans ces deux postes, l'assemblage consiste à installer des composants avec ou sans l'aide d'outil, sur une structure d'assemblage défini (voir Figure 41). Les composants à utiliser pour réaliser les assemblages sont très variés de par leur taille, forme et poids : très petits (e.g., vis, écrous), moyens (e.g., équerres, plaques) et grands (e.g., montants, ballons de chaudière).

Les tâches d'assemblage à réaliser peuvent être découpées en quatre catégories :

- *Prélèvements* : e.g., saisir le composant (vis, écrou) à l'emplacement indiqué
- *Positionnements* : e.g., positionner le composant à l'emplacement indiqué
- *Utilisations d'outil* : e.g., utiliser la visseuse, ou verrouiller les sauterelles
- *Manipulations* : e.g., tourner, déplacer, assembler deux composants ensemble

Le poste d'assemblage 101.1 se compose de 33 étapes de complexité moyenne : 12 x Prélèvements, 8 x Positionnements, 6 x Utilisations d'outil, 7 x Manipulations. Le poste d'assemblage 101.2 se compose de 13 étapes de complexité faible : 4 x Prélèvements, 5 x Positionnements, 3 x Utilisations d'outil, 1 x Manipulations.

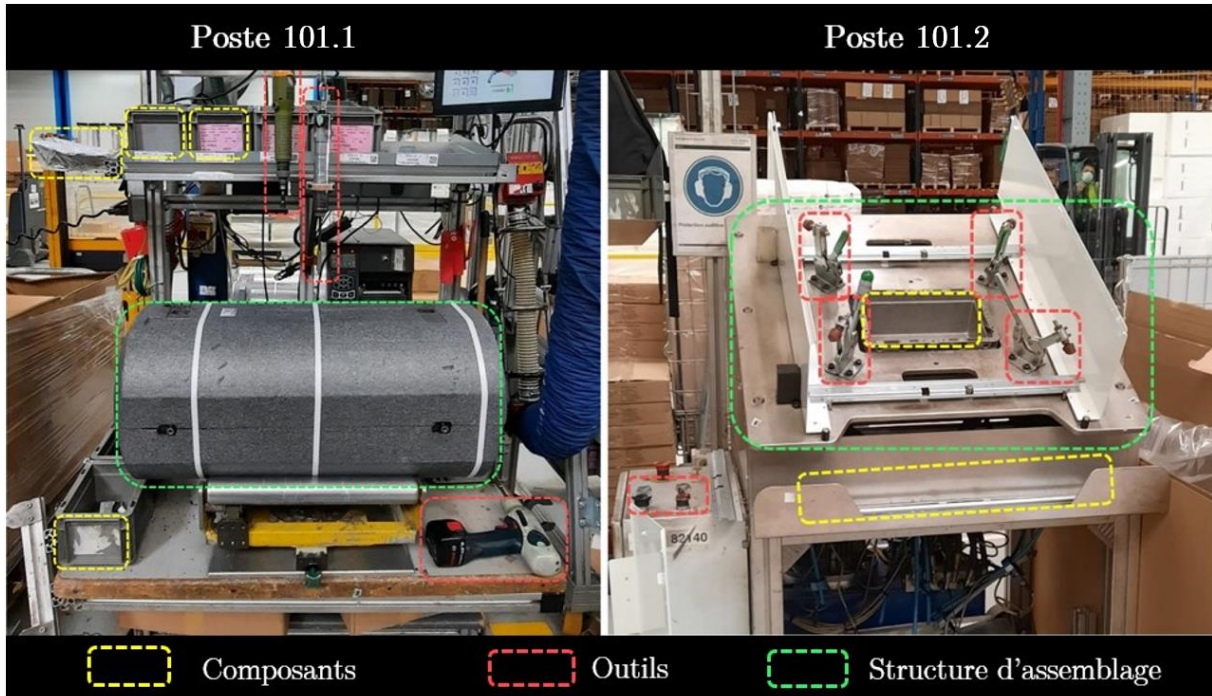


Figure 41 - Photographies postes d'assemblage 101.1 et 101.2.

Instructions assemblage

Les fiches de postes papier proposées au sein d'elm.leblanc ne sont pas adaptées aux personnes novices, puisqu'elles ne permettent pas de réaliser l'ensemble des étapes d'assemblage sans l'aide d'un chef d'équipe. Nous avons donc réalisé nous-mêmes les instructions d'assemblage que les participants ont utilisées. Cela nous a permis de pouvoir créer les instructions de manière équivalente entre celles utilisées en RA et celles présentées dans l'ordinateur.

Étant donné la complexité de certaines opérations à effectuer, qui ne peuvent pas être expliquées de manière compréhensible avec du texte et des images, l'utilisation de vidéos était indispensable. Ainsi, seul un dispositif permettant le visionnage de vidéos pouvait constituer le support d'instruction contrôle. Le choix de l'ordinateur par rapport à une tablette est justifié par le fait que l'ordinateur tout comme la RA permet de garder les mains libres, ce qui est indispensable à la réalisation de l'assemblage manuel.

Les ressources utilisées pour transmettre les informations, dans le casque de RA ou dans l'ordinateur, comprennent : du texte, des signes et symboles, des photos et des

vidéos. Chaque instruction d'assemblage est composée visuellement de trois éléments apportant trois informations différentes :

- *Quoi* : Une information textuelle indiquant la tâche d'assemblage à réaliser
- *Où* : Une flèche indiquant l'emplacement physique de l'instruction à exécuter.
- *Comment* : Selon la complexité de la tâche, une image du composant à utiliser ou une vidéo indiquant la séquence de mouvements à effectuer.

Les instructions présentées dans l'HoloLens ou dans l'ordinateur, étaient identiques, avec le même nombre d'étapes et les mêmes informations (i.e., où, quoi, comment), voir Figure 42. Les différences existantes entre les deux supports concernent le fait que les instructions en RA sont spatialisées alors que celles dans l'ordinateur sont fixes à un emplacement donné. Les différences concernent également les interactions qui sont possibles entre l'utilisateur et le support.

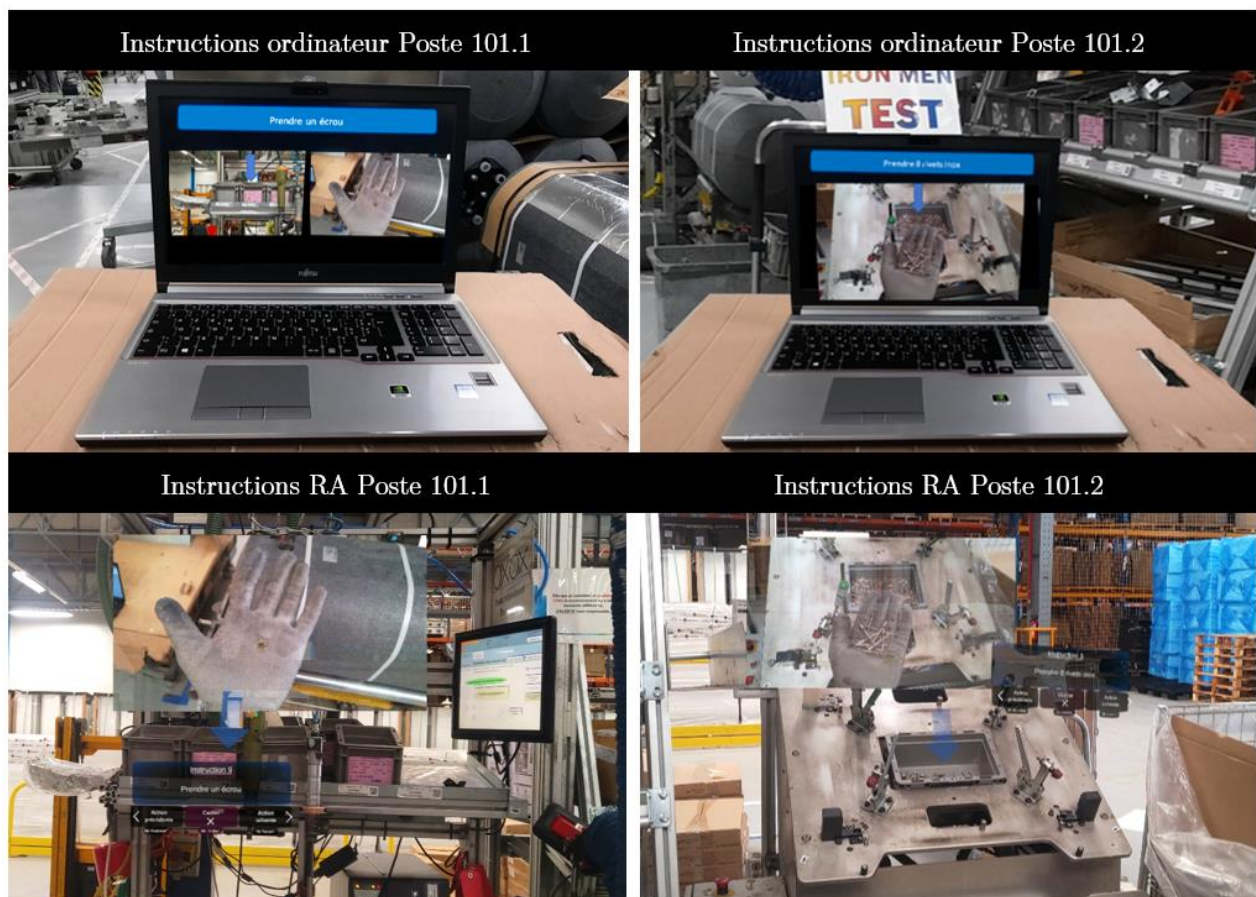


Figure 42 - Photographies des instructions d'assemblage pour le poste 101.1 (en haut) et 101.2 (en bas), dans la condition ordinateur (à gauche) et la condition RA (à droite).

Pour les instructions dans l'ordinateur, l'utilisateur interagit par le biais de deux flèches sur le clavier, celle du haut pour revenir à l'étape précédente et celle du bas qui passe à la suivante. Pour les instructions dans le casque de RA, le participant peut réaliser différentes actions en « touchant » du bout du doigt le bouton « suivant », « précédent » et « cacher ». Il peut également réaliser les mêmes actions à l'aide de commandes vocales, en prononçant les mots « suivant » « précédent » « cacher » respectivement. Après avoir caché les instructions (e.g., si elles gênent le champ de vision), le participant peut les faire réapparaître à l'aide la commande vocale « aide-moi ». Pour pouvoir interagir avec l'interface développée, une courte phase de calibration de l'HoloLens 2 se déclenche automatiquement lors de la détection d'un nouvel utilisateur, afin de permettre un affichage personnalisé (tenant compte notamment de l'écart inter-pupillaire). Ensuite, l'utilisateur doit scanner avec l'HoloLens 2 un QR code qui permet l'identification du poste. Après avoir sélectionné l'application correspondante dans l'interface Microsoft, il est possible d'accéder aux étapes d'instructions.

4.4.1.4 Procédure

Dans un premier temps, les consignes générales sur le déroulement de l'étude ont été expliquées aux participants et les deux tâches à réaliser ont été présentées.

Les participants devaient en premier lieu effectuer une tâche principale correspondant à la réalisation de l'assemblage complet des composants pour chaque poste en utilisant les instructions correspondantes (i.e., dans le casque RA ou dans l'ordinateur). Il a été demandé aux participants de bien respecter les instructions, en essayant de faire le moins d'erreurs possible.

Il a ensuite été expliqué aux participants qu'en plus de la tâche principale d'assemblage une seconde tâche était à effectuer en même temps. Cette tâche secondaire correspondait à une détection de stimuli auditifs. Les participants devaient répondre oralement le plus rapidement possible en prononçant la syllabe « ta » à la suite du stimulus sonore. Ces stimuli correspondaient à des « bips » (100ms) produits de façon aléatoire toutes les 15 à 25s et étaient émis depuis une enceinte mobile positionnée à proximité des participants. Il a été précisé aux participants que la tâche d'assemblage étant la tâche principale elle restait prioritaire sur la tâche de détection de bip.

Selon la condition d'instruction dans laquelle se trouvaient les participants, il leur a été expliqué comment interagir avec l'interface correspondante. Lors de l'utilisation des instructions en RA, l'HoloLens 2 a été placé sur la tête du participant en s'assurant de son bon positionnement. Après la phase de calibration de l'HoloLens 2, les caméras de l'eye tracker (directement intégrées sur l'HoloLens 2) étaient repositionnées de sorte à être en face des pupilles du participant, en s'assurant que le logiciel détecte bien ces dernières.

Une fois les participants ayant confirmé avoir compris l'ensemble des consignes, les enregistrements étaient démarrés (enregistrement audio des réponses orales, enregistrement des caméras de l'eye tracker, enregistrent des temps d'assemblage pour chaque étape). Une fois les participants prêts, le programme PsychoPy permettant de générer les bips était déclenché et les participants démarraient la première étape d'assemblage sur le support d'instructions correspondant.

Pendant que les participants effectuaient l'assemblage, il y avait vérification des étapes d'assemblage par l'expérimentatrice et si une erreur était réalisée par le participant sans que celui-ci ne la résolve, elle lui était notifiée. À la fin de l'assemblage complet du poste, les participants pouvaient retirer le casque et devaient remplir le NASA-TLX. Après 10 min de pause, ils effectuaient l'assemblage du deuxième poste dans l'autre condition de support d'instruction, avec les mêmes consignes. À la fin du second assemblage, les participants devaient à nouveau remplir le NASA-TLX. Ils devaient également répondre à un questionnaire sur leur état de santé visuelle, leur expérience et habitude antérieures avec les technologies (i.e., jeux vidéo, RV et RA), leur expérience d'assemblage manuel, mais également leur préférence concernant le support d'instruction (voir Annexe 7).

4.4.2 Résultats

Les analyses statistiques ont été réalisées avec JASP (JASP Team, 2019). Les analyses ont été effectuées après avoir vérifié les conditions d'application des tests paramétriques. Le test de Shapiro-Wilk a été effectué pour s'assurer que les résidus étaient normalement distribués. Le test de sphéricité de Levene a été utilisé pour vérifier que la variance des erreurs dans les groupes d'échantillons est équivalente.

4.4.2.1 Indicateurs d'efficacité

Temps d'assemblage

Un effet principal du type de support a été retrouvé sur le temps d'assemblage, $F(1, 49) = 23.60$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.325$. Les participants ont réalisé les assemblages plus rapidement (en secondes) dans la condition ordinateur ($M = 551.615$, $ET = 177.29$) que dans la condition RA ($M = 868.42$, $ET = 269.56$). Un effet principal de la complexité a également été observé sur le temps d'assemblage, $F(1, 49) = 71.22$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.592$. Les participants ont réalisé les assemblages plus rapidement dans la condition simple ($M = 434.83$, $ET = 147.21$) que dans la condition complexe ($M = 985.21$, $ET = 299.63$). Aucun effet d'interaction entre la complexité et le type de support n'a été retrouvé, $F(1, 49) = 1.14$, $p = 0.29$, $\eta_p^2 = 0.023$.

Nombre d'erreurs

Aucun effet principal de la complexité, du type de support et d'interaction n'a été retrouvé sur le nombre d'erreurs d'assemblage non résolues ($ps > 0.420$).

4.4.2.2 Charge mentale

Physiologique : oculométrie

Le taux et la durée de clignements ainsi que la taille de la pupille (voir paragraphe 4.2.3.2) ont été mesurés à l'aide de l'eye tracker pour tous les participants, cependant en raison de problèmes d'acquisition et d'enregistrement des données, l'analyse des données oculaires a été réalisée uniquement pour les 17 participants ayant les deux sessions d'assemblage avec l'ensemble des données oculaires enregistrées complètement. Les clignements ayant une durée inférieure à 50ms et supérieure à 500ms ont été supprimés de l'analyse (Caffier et al., 2003), représentant 18 % des données.

Un effet principal du type de support a été retrouvé sur le taux de clignement oculaire, $F(1, 32)=4.69$, $p=0.08$, $\eta_p^2=0.128$. Le taux de clignement est plus faible dans la condition RA ($M=12.21$, $ET=5.52$) que dans la condition ordinateur ($M=16.71$, $ET=6.73$). Aucun effet principal de la complexité n'a été retrouvé, $F<1$.

Un effet d'interaction entre complexité et type de support a été observé sur le taux de clignement, $F(1, 32)=5.67$, $p=0.023$, $\eta_p^2=0.151$ (voir Figure 43). L'analyse des effets simples montre une différence significative entre le type de support pour la condition simple $F(1, 32)=11.11$ $p=0.02$, mais pas pour la condition complexe $F<1$. Ainsi, en condition simple, le taux de clignement est plus faible avec la RA ($M=10.29$, $ET=4.83$) qu'avec l'ordinateur ($M=19.74$, $ET=6.46$), tandis qu'il n'y a pas de différence en condition complexe entre la RA ($M=14.12$, $ET=3.21$) et l'ordinateur ($M=13.67$, $ET=7.00$).

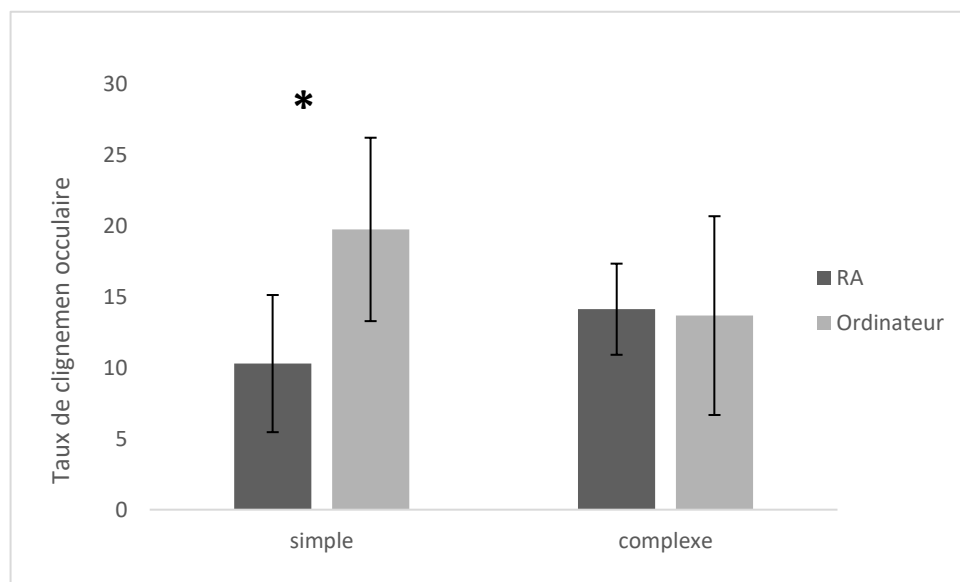


Figure 43 - Taux de clignement oculaire moyen, selon le support d'instruction et la complexité du poste. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * Significatif à 0.05.

Aucun effet principal de la complexité, du type de support et d'interaction n'a été retrouvé sur la durée moyenne des clignements, ($p > 0.420$).

Un effet principal du type de support a été observé sur la taille de la pupille, $F(1, 47) = 4.90$, $p = 0.032$, $\eta_p^2 = 0.095$. La taille de la pupille (en pixels) est plus petite dans la condition RA ($M = 24.81$, $ET = 6.15$) que dans la condition ordinateur ($M = 27.95$, $ET = 5.66$). Aucun effet principal de la complexité ou d'effet d'interaction n'a été mis en évidence ($p > 0.435$).

Comportementale : tâche secondaire

Les temps de réaction à la tâche de détection des bips inférieurs à 100ms et supérieurs à 1500ms ont été supprimés de l'analyse, représentant 6% des données. Un effet principal du type de support a été retrouvé sur le temps de réaction à la tâche de détection des bips, $F(1, 47) = 8.785$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.157$. Les temps de réaction à la seconde tâche étaient plus courts dans la condition ordinateur ($M = 698.06$, $ET = 129.19$) que dans la condition RA ($M = 811.19$, $ET = 136.83$). Aucun effet principal de la complexité n'a été retrouvé, $F < 1$.

Un effet d'interaction entre complexité et type de support a été observé sur les temps de réaction à la tâche de détection des bips, $F(1, 47) = 6.17$, $p = 0.017$, $\eta_p^2 = 0.116$ (voir Figure 44). L'analyse des effets simples montre une différence significative entre le type de support pour la condition simple $F(1, 47) = 15.12$, $p < 0.001$, mais pas pour la condition

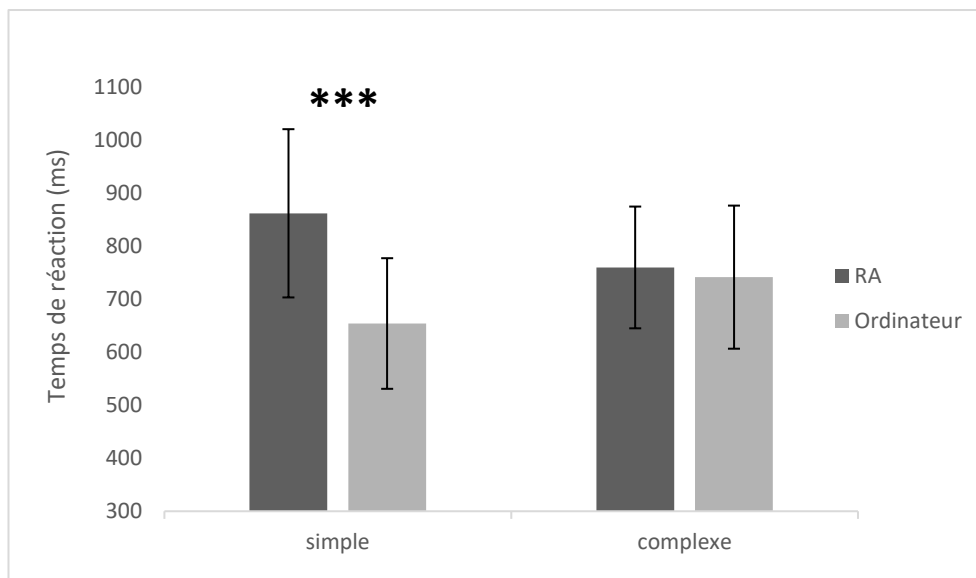


Figure 44 - Temps de réaction moyen à la tâche secondaire, selon le support d'instruction et la complexité du poste. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type.

*** Significatif à 0.001.

complexe $F < 1$. Ainsi, en condition simple, les temps de réaction sont plus courts avec l'ordinateur ($M=654.32$, $ET=123.24$) qu'avec la RA ($M=862.27$, $ET=158.76$), tandis qu'il n'y a pas de différence en condition complexe entre l'ordinateur ($M=741.80$, $ET=135.01$), et la RA ($M=760.11$, $ET=114.89$).

Un effet principal du type de support a été observé sur le nombre d'omissions à la tâche de détection des bips, $F(1, 47)=5.26$, $p=0.026$, $\eta_p^2=0.101$. Le nombre de bips non détectés était plus important dans la condition RA ($M=3.21$, $ET=3.32$) que dans la condition ordinateur ($M=1.40$, $ET=1.89$). Aucun effet principal de la complexité n'a été retrouvé, $F(1, 47)=2.47$, $p=0.123$, $\eta_p^2=0.05$, ni aucun effet d'interaction, $F < 1$.

Subjective : NASA-TLX

Seul un effet principal de la complexité de l'assemblage a été observé sur la dimension physique de la charge mentale, $F(1, 49)=6.290$, $p=0.016$, $\eta_p^2=0.114$. Les participants ont rapporté plus de charge physique (ici dû au poids de certains composants et à la force nécessaire pour certaines actions) pour le poste complexe ($M=31.85$, $ET=23.83$) que pour le poste simple ($M=17.45$, $ET=11.80$). Aucune différence significative n'a été retrouvée pour les autres dimensions ni pour les effets principaux ni pour l'effet d'interaction ($ps > 0.125$).

4.4.3 Discussion

La manière dont la RA pourrait affecter les performances et la sécurité des opérateurs est au centre du projet IRON-MEN. Dans cette étude, nous avons donc évalué les effets de l'intégration de la RA directement au sein des lignes d'assemblage d'elm.leblanc, sur l'efficacité des performances d'assemblage et sur la charge mentale des utilisateurs.

Les résultats de notre étude montrent que l'utilisation d'instructions en RA entraîne des temps d'assemblage plus longs qu'avec les mêmes instructions sur ordinateur. Ceci est en accord avec de nombreuses études ayant également observé que la RA entraînait des temps d'assemblage plus longs comparé à des instructions papier (Haniff & Baber, 2003; Min et al., 2020), vidéos (Loch et al., 2016) ou sur tablette (Funk et al., 2016).

Néanmoins, contrairement à plusieurs études montrant un effet bénéfique de la RA pour la réduction du nombre d'erreurs d'assemblage (Bode, 2019; Hou et al., 2015, 2013; Hou & Wang, 2013; Yang et al., 2019), nous n'avons pas retrouvé ce bénéfice dans notre étude. Ceci peut être expliqué par le fait que les étapes d'assemblage étaient fortement dépendantes les unes des autres, ainsi si une erreur avait été commise, les participants s'en apercevaient souvent eux-mêmes, car ils ne pouvaient pas réaliser l'étape suivante correctement. Ainsi comme seules les erreurs non résolues par les participants eux-mêmes

ont été notifiées, il y en avait globalement peu quel que soit le type de support d'instruction utilisé.

Bien que la RA ne permette pas de faire l'assemblage plus rapidement et avec moins d'erreur, le questionnaire post-expérimental nous montre que la RA est le support d'instruction préféré par les participants (20 participants), en comparaison à l'ordinateur (6 participants), $X^2(1,26) = 7.54, p < 0.001$. D'après les commentaires des participants, cette préférence et meilleure acceptabilité proviendrait notamment de l'aspect pratique des commandes vocales (laissant les mains libres à l'utilisateur), de la spatialisation des instructions et de la dimension novatrice associée à la RA. Selon les participants ayant une préférence pour l'ordinateur, celle-ci s'expliquerait par une meilleure connaissance et familiarisation de l'ordinateur pour lequel ils sont habitués. Comme observé dans l'étude 3, le niveau de familiarisation aux nouvelles technologies peut impacter les performances des utilisateurs de RA. Ainsi, le manque de familiarisation pourrait expliquer l'augmentation des temps d'assemblage associée à la RA.

Concernant l'évaluation la charge mentale, de nombreuses études ont souligné l'importance d'utiliser une combinaison de mesures physiologiques, subjectives et comportementales, nous avons fait le choix d'une combinaison associant le paradigme de la double tâche, des mesures oculaires et le NASA-TLX.

Les résultats de la mesure comportementale (i.e., tâche secondaire), indiquent que les participants ont moins souvent détecté les stimuli auditifs lorsqu'ils utilisent les instructions en RA. Il semblerait que la charge mentale soit donc supérieure lors de l'utilisation de la RA. Ceci peut être appuyé par les temps de réaction des participants à la tâche qui sont également plus longs lorsqu'ils utilisent la RA. L'utilisation de la RA engendrerait une charge mentale supérieure et empêcherait ainsi les utilisateurs de répondre aussi efficacement et rapidement à un stimulus extérieur que lorsqu'ils utilisent un ordinateur. Ces résultats peuvent être mis en lien avec le phénomène de distraction cognitive (Kim & Gabbard, 2019), dans lequel la RA a un impact sur l'allocation des ressources attentionnelles des utilisateurs. Dans notre étude, les objets virtuels en RA semblent attirer et distraire l'attention de l'utilisateur au détriment de la détection des stimuli non virtuels.

Les données de la mesure comportementale montrent une différence de l'effet de la RA selon la complexité de l'assemblage à réaliser. En effet, la RA entraîne des temps de réaction plus longs en comparaison de l'ordinateur uniquement lorsque le poste d'assemblage est simple. Ces données vont dans le sens de certaines études suggérant que la RA n'est efficace et bénéfique que lorsque la tâche à réaliser présente un niveau de complexité plus important (Wiedenmaier et al., 2003). Bien que l'on n'observe pas de gain à l'utilisation de la RA lors de la réalisation d'un poste complexe, il y a tout de même diminution

de l'effet négatif de la RA, qui semble alors présenter un niveau de charge mentale équivalent à celui des instructions dans l'ordinateur.

Le même pattern de résultats est également retrouvé pour les données physiologiques. En effet, le nombre de clignements oculaires est plus faible lors de l'utilisation d'instruction en RA en comparaison à l'ordinateur, ce qui suggère une plus grande charge mentale (Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006; Cain, 2007). Par ailleurs, l'effet d'interaction observé entre le facteur complexité et type de support d'instruction sur le taux de clignement oculaire, montre également que la charge mentale qui est associée à l'utilisation de la RA pour un poste simple, devient équivalente à celle de l'ordinateur lorsque le poste est complexe. L'analyse de la taille de la pupille montre que cette dernière est plus petite en RA qu'avec l'ordinateur. Bien que ceci puisse indiquer une plus grande charge mentale en RA (Peinkhofer et al., 2019), la différence notable de luminosité entre les conditions ordinateur et RA ne nous permet pas de pouvoir conclure sur la variation de la charge mentale à partir de cette mesure.

Les données comportementales et physiologiques montrent toutes deux que la charge mentale augmente en RA et que cette augmentation s'observe dans le cas de la réalisation d'un assemblage simple. Nous suggérons que ces données pourraient être expliquées par le fait que la présentation d'instructions d'assemblage en RA présenterait à la fois un coût, mais également un bénéfice, dont le rapport varierait selon la complexité du poste. Ainsi, lorsque le poste est simple (faible demande mentale et physique), le potentiel bénéfice de la RA est réduit à son minimum, laissant apparaître uniquement le coût associé à son utilisation. Cependant lorsque le poste est plus complexe, le bénéfice et le coût se compensent.

Du point de vue de la théorie de la charge cognitive, ces données pourraient être expliquées par une proportion variable entre la charge intrinsèque (i.e., difficulté propre à la tâche) et extrinsèque (i.e., les modalités de présentation de l'information), selon le niveau de complexité des postes ainsi que le type d'affichage (voir Figure 45 pour une illustration schématique). En effet, la charge extrinsèque associée à l'interface en RA est possiblement plus importante du fait de la nouveauté que cela représente, en comparaison de la charge extrinsèque associée à l'ordinateur. Par ailleurs, la charge intrinsèque pour le poste simple est plus faible que celle pour le poste complexe. Dans le cas d'un poste simple, la charge intrinsèque associée serait trop faible pour pouvoir être diminuée quel que soit le type d'affichage d'instructions, de sorte que même dans le cas où la RA présenterait un bénéfice, celui ne pourrait être observé. Cependant, dans le cas d'un poste complexe, la charge intrinsèque est plus importante. La RA permettant d'afficher de manière contextualisée les informations sur l'identité de la pièce, de la position et de l'action correspondante, elle permet de réduire le nombre d'éléments en interaction qui doivent être traités simultanément et donc de diminuer la charge intrinsèque. Dans ce

cas, la somme totale de la charge intrinsèque et extrinsèque en RA deviendrait égale à celle avec l'ordinateur. Ainsi, en présentant l'information de manière plus optimale, en améliorant l'interface en RA, ou en augmentant le niveau de connaissance et familiarisation des utilisateurs avec la RA, la charge extrinsèque pourrait réduire, de même que la charge cognitive totale. De futures études utilisant diverses interfaces en RA ou des niveaux de complexité mentale différents pourraient permettre de répondre à cette hypothèse explicative et ainsi identifier le niveau de complexité nécessaire pour que le bénéfice de la RA dépasse le coût associé à son utilisation.

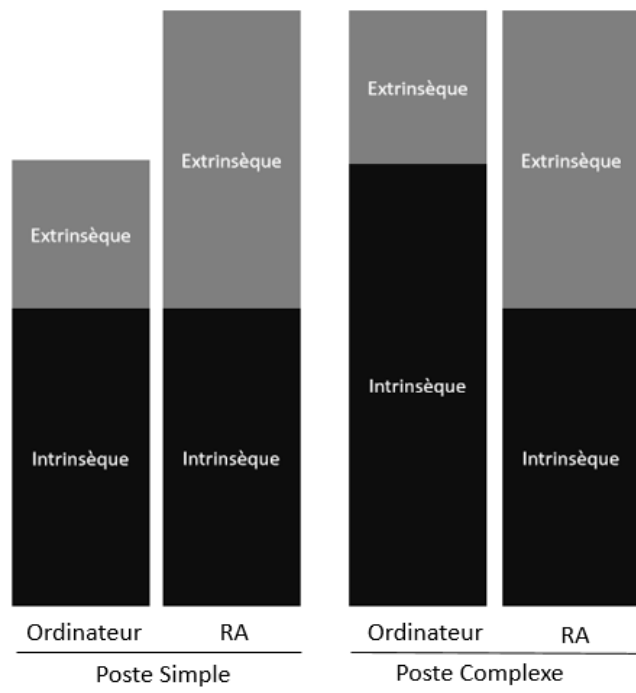


Figure 45 - Illustration schématique de la proportion de la charge cognitive intrinsèque et extrinsèque selon la complexité du poste et le type d'affichage.

Concernant les méthodes d'évaluation de la charge mentale, bien que les mesures comportementales et physiologiques indiquent des résultats allant dans le même sens, la mesure subjective du NASA-TLX, n'indique pas une plus grande charge mentale perçue en RA par les participants. Le fait que les données physiologiques et comportementales n'aillent pas dans le même sens que les données subjectives a déjà été observé (Luque-Casado et al., 2016; Miyake, 2001). L'étude des différentes dimensions du NASA-TLX nous indique que les participants perçoivent et rapportent uniquement une différence sur la dimension physique entre les postes simples et complexes. Cette charge physique n'est vraisemblablement pas en lien avec le poids du casque qui était porté, peu importe la condition, mais davantage avec le fait que le poste complexe nécessite plus de force due à l'utilisation de visseuses et au poids du ballon (environ 15kg).

Enfin, concernant la question de l'évaluation de la charge mentale, la comparaison des trois méthodes d'évaluations utilisées, nous a permis d'observer que dans notre étude seules les mesures d'oculométrie et de la tâche secondaire ont été sensibles à la charge mentale et quelles ont montré le même pattern de résultat. Étant donné les équipements nécessaires et le coût financier qui peuvent être associés à l'utilisation de certains eye tracker, il semble que la mesure comportementale qui ne présente pas de contrainte spécifique, soit une mesure particulièrement appropriée aux conditions industrielles testées dans cette étude. Cependant, notons que l'utilisation de plusieurs mesures permet tout de même fournir des données différentes et complémentaires.

4.4.4 Conclusion

Dans le cadre du projet IRON-MEN, une solution de RA développée dans le casque Microsoft HoloLens 2 (Lavric et al., 2021), a été testée directement sur les lignes d'assemblage de l'usine d'elm.leblanc. L'objectif de cette dernière étude était d'évaluer l'efficacité des performances d'assemblage et d'estimer la charge mentale lors de l'utilisation de la RA comme support d'instruction. Cette étude est à notre connaissance la seule à avoir étudié, directement en milieu industriel en France, la charge mentale par une combinaison de trois types de mesures différentes (objectives, subjectives, comportementales).

Nos résultats montrent que la RA ne présente pas de bénéfice en termes d'efficacité des performances, car elle ne permet pas de réduire les erreurs d'assemblage, voire dégrade les temps d'assemblage. Concernant la charge mentale, deux mesures sur trois indiquent que la RA donne lieu à plus de charge mentale lorsque le poste d'assemblage est simple, mais que lorsqu'il est complexe la RA est équivalente à des instructions sur ordinateur. Les données comportementales indiquent que lorsque les participants utilisent la RA, ils détectent moins souvent et moins rapidement des stimuli extérieurs, suggérant une distraction cognitive en RA. Cette distraction cognitive souligne le fait que les ressources attentionnelles d'un opérateur utilisant la RA pourraient être moins disponibles à la détection d'évènement extérieur (danger, alerte) et ainsi jouer un rôle important dans la survenue d'accidents du travail. Dans le cadre d'une utilisation industrielle, la RA devrait donc être utilisée avec précaution. Toute intégration d'instructions en RA dans un cadre industriel devrait donc être associée à un protocole d'évaluation afin de quantifier les potentiels impacts sur les performances et de s'assurer que la solution RA proposée apporte plus de bénéfices que la solution déjà existante.

Afin de mieux évaluer dans quelles conditions la RA pourrait être utilisée, d'autres études sont nécessaires. En effet, il pourrait être intéressant d'évaluer comment la charge mentale en RA varie selon des niveaux de complexité en contrôlant la difficulté physique associée. Par ailleurs, notre étude s'est intéressée à l'utilisation de la RA pour le guidage d'assemblage et non pas pour l'apprentissage. Or, comme présenté précédemment, l'étude

de l'apprentissage en RA joue un rôle majeur dans le cadre de la formation industrielle. Ainsi, bien que ne faisant pas partie du cas d'usage défini dans le projet IRON-MEN, il serait intéressant d'évaluer comment les paramètres mesurés dans cette étude peuvent varier après plusieurs cycles d'utilisation et comment l'apprentissage et l'augmentation du niveau de familiarisation influence la charge mentale et cognitive extrinsèque avec le temps d'utilisation. De nouvelles études pourraient ainsi analyser l'utilisation de la RA pour des cycles d'assemblage plus longs et plus réguliers, ainsi que des cycles sans support d'instruction en RA.

4.5 Conclusion générale

De nombreuses études suggèrent que la RA aurait le potentiel de réduire la charge mentale de l'utilisateur. En effet, de par la spatialisation des informations et leur intégration dans la zone d'intérêt de l'utilisateur, elle permet de réduire les mouvements de tête ainsi que la demande en MDT. Cependant, plusieurs études réalisées dans le domaine de l'assemblage montrent que la RA peut augmenter la charge mentale, de par l'ajout important de nombreuses informations dans le champ visuel de l'utilisateur.

Dans le cadre du projet IRON-MEN, la question des performances et de la santé de l'opérateur est centrale. Nous avons donc proposé une étude ayant pour but d'adresser les différentes lacunes identifiées dans la littérature, en réalisant une étude directement en milieu industriel, sur une ligne d'assemblage et avec une évaluation de la charge mentale la plus complète possible (associant mesure objective, subjective, et comportementale).

Les résultats de cette étude suggèrent que l'utilisation de la RA ne présente pas nécessairement de bénéfice en termes d'efficacité des performances, car elle ne réduit pas les erreurs d'assemblage et semble même augmenter les temps d'assemblage. En ce qui concerne la charge mentale, la mesure physiologique et comportementale indique que la RA augmente la charge mentale lorsque le poste d'assemblage est simple, mais qu'elle est équivalente à celle engendrée par un ordinateur quand le poste est complexe. Le fait que les données physiologiques et comportementales présentent un pattern de résultats identique souligne la pertinence de la combinaison de plusieurs mesures augmentant la validité méthodologique des données obtenues.

Enfin, nos données suggèrent une augmentation de la charge mentale en RA, mais elles restent spécifiques à notre cas d'usage, i.e., aux postes choisis au sein d'elm.leblanc ainsi qu'à l'interface développée dans le cadre du projet. En lien avec les objectifs d'assemblage des postes choisis, l'interface en RA projetait des informations simples concernant le *Quoi*, le *Où* et le *Comment*, nécessaires à l'assemblage. Bien que ce cas d'usage soit écologique et représentatif d'un milieu d'assemblage industriel, celui-ci n'a pas permis d'évaluer

l'utilisation de la RA en cas de forte charge mentale. Or d'autres cas d'usage (e.g., Défense, aviation, industrie) peuvent impliquer une exigence mentale plus forte, e.g., imposant à l'utilisateur de décider ou calculer, de réaliser une surveillance de paramètres en temps réel. Ces cas d'usages pourraient permettre d'observer des variations encore plus importantes de la charge mentale et ainsi d'évaluer dans quelle mesure, l'opérateur passe en surcharge mentale. Ces tâches qui demandent intrinsèquement plus de charge mentale, pourraient être particulièrement pertinentes pour comparer les effets de la RA comme support d'instruction à ceux d'un ordinateur, et ainsi identifier s'il y a plus de bénéfice mais également plus d'impact négatifs à l'utilisation de la RA pour de telles tâches. Étant donnée la forte augmentation des projets visant à intégrer la RA, l'étude la charge mentale associée à différents scénarios d'utilisation doit se poursuivre.

CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Contexte industriel et objectifs de la thèse

Les avancées matérielles et informatiques ont permis à la RA de s'intégrer dans la sphère professionnelle. De plus en plus d'entreprises mettent ainsi en place des projets industriels utilisant la RA, telle que l'entreprise elm.leblanc qui a établi un partenariat scientifique et industriel visant à intégrer la RA au sein de ses lignes de production. L'objectif du projet IRON-MEN, est de développer une application de RA assurant la formation des opérateurs travaillant sur les lignes d'assemblage et de production, à la fois pour permettre un meilleur accompagnement d'un nouvel opérateur lors de sa formation initiale, ou encore pour faciliter la formation d'un opérateur expérimenté à l'assemblage d'un nouveau produit.

Dans le cadre du projet IRON-MEN, l'évaluation de la sécurité et de la santé des futurs utilisateurs est une étape centrale, avant toute utilisation effective de la RA de façon régulière et prolongée. L'objectif de cette thèse était donc d'évaluer les impacts physiologiques et cognitifs liés à l'utilisation de la RA, afin d'identifier les potentiels risques sanitaires associés.

Principaux résultats et contributions

Cinq études expérimentales ont été réalisées afin de répondre à trois problématiques majeures concernant les effets potentiels de la RA sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale.

Les effets physiologiques de la RA sur la vision binoculaire ont été évalués avec deux études associant des mesures optométriques de la fatigue visuelle, ainsi que des mesures subjectives de l'inconfort visuel. Nos résultats suggèrent que l'utilisation d'une interface affichant des instructions 2D en RA pendant 30 min, ne présente pas plus de risque pour la vision binoculaire (fatigue visuelle et inconfort visuel) que les instructions papier classiques. Les données obtenues ont également fait apparaître certaines divergences entre les mesures objectives (optométriques) et subjectives (questionnaire), soulignant l'important d'associer les deux afin d'évaluer au mieux les impacts de la RA sur ses utilisateurs. (Étude 1). En réalisant une réplique de l'étude 1 auprès d'une population de patients (du service d'ophtalmologie du CHRU de Brest), nous avons également observé que l'utilisation d'une telle interface n'était pas plus à risque pour les personnes présentant des troubles modérés de la vision binoculaire préexistants (Étude 2). Ces deux études suggèrent qu'il est possible d'utiliser la RA sans que cela ne porte atteinte aux performances et au confort visuel des utilisateurs.

Au-delà des effets physiologiques, les potentiels effets cognitifs associés à l'utilisation de la RA ont également été examinés dans ce travail de thèse. Deux études ont été réalisées afin d'examiner les effets de la RA sur l'attention visuelle ainsi que la différence de traitement cognitif entre les éléments virtuels et réels. Nos travaux montrent que le

fait de traiter simultanément des informations virtuelles et réelles pouvait dégrader les performances visuelles de certains utilisateurs et que la détection d'évènements inattendus pourrait être altérée lors de l'utilisation de la RA. Nous avons également mis en avant l'influence du niveau de familiarisation des utilisateurs concernant les jeux vidéo et plus largement les nouvelles technologies sur leur performance, et ainsi la pertinence de le prendre en compte (Étude 3). Par ailleurs, nous avons montré que l'orientation de l'attention visuo-spatiale en RA est sensible à la profondeur et que les mécanismes de l'effet d'IOR s'appliquent également pour des stimuli virtuels. Enfin, nous avons mis en évidence que les mécanismes attentionnels semblent être davantage influencés par le traitement simultané d'informations virtuelles et réelles que par le traitement d'informations virtuelles seules (Étude 4). Les résultats de ces deux études semblent aller dans le sens de l'hypothèse selon laquelle le traitement simultané des informations virtuelles et réelles présente un coût et ainsi que les informations réelles et virtuelles en RA formeraient deux groupes perceptifs différents. Ainsi, ces études soulignent que le coût attentionnel associé à l'utilisation de la RA n'est pas à négliger et peut impacter les performances et capacités des utilisateurs.

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'intégration effective de la RA en milieu industriel et à l'évaluation de son efficacité en tant que support de formation aux tâches d'assemblage. Après avoir réalisé une importante revue de la littérature sur le sujet, nous avons proposé une étude directement réalisée sur les lignes de production d'elm.leblanc, ayant pour but l'évaluation de l'efficacité de la présentation d'instructions d'assemblage en RA, ainsi que la charge mentale associée. Nos données suggèrent que l'utilisation de la RA, pour le cas d'usage proposé par elm.leblanc, ne présente pas nécessairement de bénéfice en termes d'efficacité sur les performances (temps et erreurs d'assemblage). Elle engendrerait même une augmentation de la charge mentale lorsque le poste d'assemblage est simple, mais donnerait lieu à une charge équivalente à celle d'un ordinateur quand le poste est complexe. Une explication à ces résultats serait que la RA permet toute de même une réduction de la charge cognitive intrinsèque des tâches complexes, mais que celle-ci n'est pas rendue visible du fait d'une importante charge extrinsèque associée à l'utilisation de la RA. Enfin, nos données soulignent la pertinence d'associer différents types de mesures (objective, subjective, comportementale) dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale (Étude 5).

Les résultats des cinq études expérimentales qui ont été menées montrent ainsi que la RA n'aurait pas d'effet sur la vision binoculaire, mais aurait un impact sur l'attention visuelle et la charge mentale. Ceci laisse penser que ce sont davantage des problématiques cognitives et non physiologiques qui sont associées à l'utilisation de la RA.

Recommandation pour l'usage de la RA en milieu industriel

Les principaux résultats obtenus dans ce travail de thèse, nous amènent à penser qu'en termes de santé du travail et de protection des opérateurs, l'usage du casque HoloLens dans les conditions d'utilisation envisagées actuellement à elm.leblanc (exposition de 30 minutes pour la formation) ne semble pas présenter de risques physiologiques ou cognitifs sévères pouvant porter atteinte à la sécurité des opérateurs. Par ailleurs, le manque de données et de recul sur l'utilisation de la RA en milieu professionnel, ne nous permet pas de donner des réponses précises sur l'usage qui doit en être fait. Toutefois, en se basant sur les résultats des cinq études de ce travail de thèse nous pouvons proposer des recommandations sur certains points d'intérêts relatifs l'utilisation de la RA que nous avons identifiés.

- Concernant la fatigue visuelle et l'inconfort visuel, les études 1 et 2 ont montré que la plainte subjective pouvait apparaître avant que des signes oculomoteurs ne puissent être objectivés par des mesures optométriques. Ainsi, la prise en compte rapide d'une plainte subjective émise par l'utilisateur pourrait permettre d'éviter l'apparition de modifications oculomotrices importantes et ainsi garantir la sécurité des utilisateurs. De ce fait, la plainte subjective légèrement plus importante observée pour les personnes présentant des troubles de la vision binoculaire, suggère que la RA devra être utilisée avec prudence pour ces personnes et notamment chez celles qui présenteraient des troubles plus avancés (e.g., glaucome, décollement de la rétine).
- Dans l'étude sur l'orientation de l'attention visuelle, nous avons observé un effet de facilitation, indiquant qu'une cible réelle est plus facile à détecter après un indicage en RA et non l'inverse. Ceci peut avoir des implications quant à la modalité à choisir pour afficher des messages d'alerte. En effet, un message d'alerte virtuel en RA permettra de mieux détecter un danger réel, cependant un message réel (e.g., sur un ordinateur) ne permettra pas à l'utilisateur de mieux détecter un élément virtuel dans le casque de RA.
- L'étude de la charge mentale réalisée directement sur les lignes d'assemblage d'elm.leblanc nous a permis de souligner l'importance de prendre en compte le niveau de complexité d'une tâche afin d'évaluer les bénéfices de la RA. En effet, la RA ne semble pas être bénéfique pour les postes simples, son utilisation devrait donc être favorisée pour des tâches de complexité élevée. L'analyse de la charge mentale et cognitive a mis en avant que la présentation et le mode d'utilisation associé à l'interface de RA pouvaient être responsable d'une charge pour l'utilisateur. Un travail d'optimisation de l'utilisabilité de l'interface en RA pourrait donc être central afin de réduire cette charge pour les utilisateurs et ainsi rendre visible le bénéfice de la RA. Dans le but de diminuer la charge liée à l'utilisation de l'interface en RA,

une phase préalable de familiarisation et de prise de connaissance globale du dispositif et de l'interface de RA à utiliser, précédant l'utilisation effective pour la réalisation de la tâche, pourrait permettre de diminuer la charge extrinsèque et d'améliorer les performances des utilisateurs.

Nous proposons également en Annexe 8, par principe de précaution au service Hygiène sécurité et Environnement d'elm.leblanc, diverses recommandations concrètes plus générales afin d'encadrer l'intégration et les usages de la RA en milieu industriel.

Perspectives de recherche

Les études sur les effets physiologiques et cognitifs de la RA restent relativement peu nombreuses dans la littérature, nos cinq études apportent ainsi des premiers éléments de réponse, mais de nombreuses autres études doivent venir compléter nos travaux afin d'apporter davantage de réponses concernant les problématiques qui ont été soulevées dans ce travail de thèse. D'après les résultats des cinq études qui ont été réalisées, nous proposons quelques perspectives pour les futures recherches :

- Dans notre étude des impacts oculomoteurs de la RA, nous avons utilisé le VRSQ (Ames et al., 2005) afin d'évaluer les symptômes d'inconfort visuel. Cependant, celui-ci n'a pas été développé spécifiquement pour l'usage de la RA, mais de la RV. Il n'existe actuellement aucun questionnaire évaluant les symptômes spécifiques à l'utilisation de la RA. Or étant donné le fort développement des dispositifs de RA, il semble important de pouvoir en évaluer les effets propres et de les différencier de ceux de la RV. De futures études pourraient alors avoir pour but le développement de questionnaires mais également des tests optométriques adaptés aux différents dispositifs de RA.
- Nos deux études sur l'attention visuelle peuvent suggérer que les informations réelles et virtuelles forment deux groupes perceptifs différents, cependant nous n'avons pas identifié les éléments responsables de cette distinction. Il serait donc pertinent de déterminer si ces éléments concernent purement les caractéristiques d'affichage (e.g., couleur, luminosité, vitesse de mouvement) et reposent ainsi sur des capacités d'ordre techniques. Dans ce cas les progrès technologiques à venir pourraient réduire la distinction existante et le coût attentionnel associé. Si au contraire les conditions d'affichage n'ont pas d'impact, cela impliquerait que le traitement des informations virtuelles repose sur des mécanismes neurocognitifs sous-jacents différents de ceux pour les informations réelles.
- Les périodes d'évaluation testées dans nos travaux étaient de courtes durées en accord avec le cas d'usage industriel défini. Cependant, la réalisation d'études longi-

tudinales associées une évaluation sur des périodes d'utilisation plus longues et répétitives pourrait permettre d'évaluer à la fois l'apparition d'effets négatifs à long-terme de la RA, mais également les effets d'apprentissage et de la familiarisation qui pourrait avoir un impact positif.

- Dans les interfaces de RA qui ont développées et utilisées dans cette thèse, les demandes oculomotrices ou cognitives associées n'ont pas été portées à leur maximum, i.e., pour les demandes oculomotrices, e.g., faible conflit accommodation vergence, objets 2D, et pour les demandes cognitives, e.g., affichage d'information simple en vision centrale. L'utilisation d'interface et de cas d'usage ayant une demande plus forte, pour le système visuel (e.g., fort conflit accommodation vergence, rivalité focale, objets virtuels 3D), mais également cognitif (e.g., surveillance de multiples informations variant en temps réel, affichage en vision centrale et périphérique, situation de stress, prise de décision rapide) pourraient apporter des éléments de réponses supplémentaires à l'étude des effets de la RA. En évaluant la RA lors d'une sollicitation plus forte des ressources de l'utilisateur il serait possible, d'identifier les conditions de survenue de la fatigue et de l'inconfort visuel ou encore de la surcharge mentale, et ainsi de pouvoir les adapter ou limiter lors de la conception de futures interfaces.

Évolution des usages et problématiques futures en RA

Au-delà des futures recherches à mener pour poursuivre l'étude des problématiques analysées dans cette thèse, les résultats de nos propres études ainsi que la revue de la littérature existante sur la RA, nous ont permis d'identifier les points d'intérêt à évaluer et surveiller concernant la RA, compte tenu notamment de l'évolution future des ses usages.

En effet, le cas d'usage principal actuellement envisagé et développé pour la RA est l'utilisation dans le cadre de la formation professionnelle pour l'apprentissage de procédure (cas du projet IRON-MEN) et celui-ci va à moyen terme fortement continuer à se développer. Nos travaux ont permis de déterminer qu'une question centrale pour l'apprentissage en RA est de pouvoir déterminer dans quelles circonstances l'utilisation de la RA présente un bénéfice pour l'apprenant ou au contraire lui apporte une surcharge. Dans le cadre de cette utilisation, les facteurs d'intérêts à examiner pour favoriser les apprentissages ne sont pas nécessairement d'ordre oculomoteur, mais davantage d'ordre cognitif. Ainsi, la façon dont l'interface et les instructions en RA sont développées, ainsi que la complexité et donc la charge mentale propre à la tâche à réaliser sont des facteurs à prendre en compte et pour les lesquels des études complémentaires sont nécessaires. L'utilisation de la RA pour la formation professionnelle et l'apprentissage entrainera, à

moyen terme une modification de la dynamique existante au sein du monde du travail et à plus long terme des changements encore plus importants.

En effet, au cours des prochaines années, il est certain que les progrès informatiques futurs permettront une amélioration des capacités de calcul, de la vitesse de traitement, une réduction du poids et du volume des équipements et une augmentation du FOV, etc. Ces développements technologiques s'accompagneront d'une diminution des coûts de fabrication associés aux différents dispositifs de RA, les rendant ainsi plus accessibles, non seulement au sein de différentes sphères professionnelles, mais également au sein du grand public. Ceci aura pour conséquences de diversifier les usages que l'on connaît actuellement, mais surtout de les intensifier.

Cette amélioration des capacités technologiques repoussera également les limites de ce qu'il sera possible de faire en RA, augmentant les capacités d'interactions et d'utilisation (e.g., développement des modalités auditives et haptiques, affichage d'informations dans l'espace central et périphérique). Ce qui aura pour conséquences d'augmenter les attentes par rapport au rôle et fonction que devra remplir la RA. Celle-ci sera de plus en plus envisagée comme la solution à des situations complexes, stressantes, voire dangereuses (e.g., médecine, aviation, Défense) pour lesquelles les capacités de l'humain chercheront à être augmentées.

Or, nos études ont mis en avant que les problématiques centrales associées à l'utilisation de la RA sont de moins en moins physiologiques, mais davantage cognitives. La principale problématique cognitive que nous avons identifiée étant que le système traite les informations virtuelles et réelles comme deux groupes perceptifs séparés, ce qui implique que le passage de l'un à l'autre, inhérent à la visualisation de contenus en RA, entraîne un coût cognitif et donc une fatigue. Dans les scénarios d'utilisation plus stimulants, stressants et sollicitant fortement les capacités d'adaptation des utilisateurs, cette problématique sera portée à son maximum. Il sera alors nécessaire de déterminer quels seront les impacts de ces scénarios difficiles sur les performances et les prises de décision des utilisateurs (e.g., diminution de l'attention et de la vitesse de traitement, modification de la vigilance). Ainsi, la question de l'identification des mécanismes cognitifs à l'œuvre lors de la visualisation de contenus en RA ainsi que celles de leurs corrélats neuroanatomiques devient centrale pour les futures recherches.

Conclusions

Le développement rapide des nouvelles technologies telles que la RA, s'accompagne d'interrogations quant à leurs éventuels effets sur la santé, notamment lorsqu'elles sont utilisées dans le milieu professionnel. Dans le cadre du projet IRON-MEN, nous avons pour objectifs d'évaluer les impacts physiologiques et cognitifs liés à l'utilisation de la RA pour un cas d'usage spécifique et délimité, afin d'identifier les potentiels risques

sanitaires associés. Dans ce but nous avons réalisé cinq études expérimentales afin adresser à trois problématiques majeures concernant les effets de la RA sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale. Les résultats obtenus nous ont permis d'apporter des premiers éléments de réponse à ces problématiques. En effet, la RA n'aurait pas d'effet négatif sur la vision binoculaire de ses utilisateurs. Cependant, bien que nos cas d'usages aient impliqué de faibles demandes cognitives, nous avons tout de même pu observer des impacts cognitifs, à la fois sur les ressources attentionnelles des utilisateurs, mais également sur leur charge mentale. La synthèse des données et conclusions de nos études, a donné lieu à la proposition de perspectives de recherche en lien avec les problématiques choisies dans ce travail de thèse ainsi qu'à la formulation de recommandations quant à l'intégration de la RA en milieu industriel.

Les travaux de cette thèse nous ont également permis d'identifier que les problématiques cognitives associées à l'utilisation de la RA sont centrales, notamment compte tenu de ses utilisations futures qui sont amenées à s'accroître et se complexifier. Nous soulignons donc l'intérêt d'identifier plus précisément les mécanismes cognitifs à l'œuvre lors de la visualisation de contenus en RA afin de répondre aux usages de demain (e.g., situations à forte demande, stress intensif, prise de décision rapide).

Enfin, notons que le manque d'études sur les effets de RA, en fait un domaine d'étude très vaste et le rapport de l'ANSES 2021 sur la RA montre qu'il persiste de nombreuses autres incertitudes sur les risques sanitaires et problématiques qui restent à être examinées par la communauté scientifique, telles que les risques psychosociaux, les problèmes d'addiction, les impacts sur le développement des enfants, etc.

BIBLIOGRAPHIE

- Afonso, P., Santana, A., Afonso, P., Zanin, A., & Wernke, R. (2017). *ScienceDirect ScienceDirect Costing models for capacity optimization in Industry 4.0: Trade-off between used capacity and operational efficiency*.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.022>
- Ahlstrom, U., & Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*(7), 623–636. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.04.002>
- Akşit, K., Kade, D., Özcan, O., & Ürey, H. (2014). Head-worn mixed reality projection display application. *ACM International Conference Proceeding Series, 2014-November*. <https://doi.org/10.1145/2663806.2663826>
- Alais, D., & Blake, R. (1999). Grouping visual features during binocular rivalry. *Vision Research*, *39*(26), 4341–4353. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00146-7)
- Alnæs, D., Sneve, M. H., Espeseth, T., Endestad, T., van de Pavert, S. H. P., & Laeng, B. (2014). Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus. *Journal of Vision*, *14*(4), 1–1. <https://doi.org/10.1167/14.4.1>
- Amenós, M. C., & Knox, P. C. (2014). The effect of a projected virtual reality training environment on vision symptoms in undergraduates. *British and Irish Orthoptic Journal*, *11*(0), 39. <https://doi.org/10.22599/bioj.84>
- Ames, S. L., Wolffsohn, J. S., & McBrien, N. A. (2005). The Development of a Symptom Questionnaire for Assessing Virtual Reality Viewing Using a Head-Mounted Display. *Optometry and Vision Science*, *82*(3), 168.
<https://doi.org/10.1097/01.OPX.0000156307.95086.6>
- Anastassova, Burkhardt, J., Mégard, C., & Ehanno, P. (2007). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage: Une revue. *Le Travail Humain*, *70*, 97–125.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3917/th.702.0097>
- Anastassova, M., Burkhardt, J. M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2005). Results from a user-centred critical incidents study for guiding future implementation of augmented reality in automotive maintenance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *35*(1), 67–77. <https://doi.org/10.1016/J.ERGON.2004.08.005>
- ANSES. (2014). *Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique* (A. É. 20214 (ed.)).
- ANSES. (2021). *Expositions aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée* (A. É. 2021 (ed.)).

- Arthur, K. W. (2000). *Effects of Field of View on Performance with Head-Mounted Displays*. University of North Carolina.
- Arvanitis, T. N., Petrou, A., Knight, J. F., Savas, S., Sotiriou, S., Gargalakos, M., & Gialouri, E. (2009). Human factors and qualitative pedagogical evaluation of a mobile augmented reality system for science education used by learners with physical disabilities. *Personal and Ubiquitous Computing*, *13*(3), 243–250. <https://doi.org/10.1007/s00779-007-0187-7>
- Atchley, P., & Kramer, A. F. (2001). Object and space-based attentional selection in three-dimensional space. *Visual Cognition*, *8*(1), 1–32. <https://doi.org/10.1080/13506280042000009>
- Avery, B., Piekarski, W., Warren, J., & Thomas, B. H. (2006). Evaluation of User Satisfaction and Learnability for Outdoor Augmented Reality Gaming. In *7th Australasian User Interface Conference, Hobart, Tas, Jan 2006*.
- Azuma, R. (1997). A survey of augmented reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (Vol. 6, Issue 4, pp. 355–385). MIT Press Journals. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *21*(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, *255*(5044), 556–559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Baddeley, A., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, *8*, 47–89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079742108604521>
- Banks, M. S., Kim, J., & Shibata, T. (2013). Insight into vergence/accommodation mismatch. *Head- and Helmet-Mounted Displays XVIII: Design and Applications*, *8735*, 873509. <https://doi.org/10.1117/12.2019866>
- Bayle, E., Guilbaud, E., Hourlier, S., Lelandais, S., Leroy, L., Plantier, J., & Neveu, P. (2019). *Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review*. 18. <https://doi.org/10.1117/12.2518928>
- Beatty, J. (1982). Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and the Structure of Processing Resources. In *Psychological Bulletin* (Vol. 91, Issue 1).
- Becklen, R. (1983). Selective looking and the noticing of unexpected events. In *Memory & Cognition* (Vol. 11, Issue 6).
- Bednarik, R., Bartczak, P., Vrzakova, H., Koskinen, J., Elomaa, A. P., Huotarinen, A., De Gómez Pérez, D. G., & Von und zu Fraunberg, M. (2018). Pupil size as an indicator of visual-motor workload and expertise in microsurgical training tasks. *Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*.

- <https://doi.org/10.1145/3204493.3204577>
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *14*(3), 199–208.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2010.12.001>
- Bimber, O., & Raskar, R. (2005). Spatial augmented reality: Merging real and virtual worlds. In *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*.
<https://doi.org/10.1201/b10624>
- Bimber, O., & Raskar, R. (2006, July 30). Modern approaches to augmented reality. *SIGGRAPH 2006 - ACM SIGGRAPH 2006 Courses*.
<https://doi.org/10.1145/1185657.1185796>
- Biocca, F. A., & Rolland, J. P. (1998). Virtual eyes can rearrange your body: Adaptation to visual displacement in see-through, head-mounted displays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(3), 262–277.
<https://doi.org/10.1162/105474698565703>
- Blake, R. (1989). A Neural Theory of Binocular Rivalry. *Psychological Review*, *96*(1), 145–167. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.1.145>
- Blake, R., & Logothetis, N. K. (2002). Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(1), 13–21. <https://doi.org/10.1038/nrn701>
- Blattgerste, J., Strenge, B., Renner, P., Pfeiffer, T., & Essig, K. (2017a). Comparing conventional and augmented reality instructions for manual assembly tasks. *ACM International Conference Proceeding Series, Part F1285*, 75–82.
<https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
- Blattgerste, J., Strenge, B., Renner, P., Pfeiffer, T., & Essig, K. (2017b). Comparing conventional and augmented reality instructions for manual assembly tasks. *ACM International Conference Proceeding Series, Part F1285*, 75–82.
<https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
- Bobier, W., & McRae, M. (1996). Gain changes in the accommodative convergence cross-link. *Ophthalmic and Physiological Optics*, *16*(4), 318–325.
[https://doi.org/10.1016/0275-5408\(95\)00113-1](https://doi.org/10.1016/0275-5408(95)00113-1)
- Bode, M. (2019). *Evaluation of an augmented reality assisted manufacturing system for assembly guidance*.
- Bolas, M., & Krum, D. M. (2010). Augmented reality applications and user interfaces using head-coupled near-axis personal projectors with novel retroreflective props and surfaces. *Ubiprojection Workshop, Pervasive '10, Helsinki, Finland*, 5–8.
- Bourke, P., Partridge, H., & Pollux, P. M. J. (2006). Additive effects of inhibiting attention to objects and locations in three-dimensional displays. *Visual Cognition*, *13*(5), 643–654. <https://doi.org/10.1080/13506280544000309>

- Boyer, S. (2017). *Contribution de l'analyse du signal vocal à la détection de l'état de somnolence et du niveau de charge mentale* [Université Paul Sabatier - Toulouse III].
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser : Adapter les technologies à l'homme*.
- Broadbent, D. E. (1958). Perception and communication. In *Perception and communication*. Pergamon Press. <https://doi.org/10.1037/10037-000>
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological Psychology*, 42(3), 361–377. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8)
- Burkhardt, J. M. (2003). Some relationships between virtual reality and ergonomics. In *Travail Humain* (Vol. 66, Issue 1, pp. 65–91). Presses Universitaires de France, Département des Revues. <https://doi.org/10.3917/th.661.0065>
- Büttner, S., Prilla, M., & Röcker, C. (2020). Augmented Reality Training for Industrial Assembly Work – Are Projection-based AR Assistive Systems an Appropriate Tool for Assembly Training? *DI.Acm.Org*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376720>
- Byers, J. C., Bittner, A. C., & Hill, S. G. (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? *Advances in Industrial Ergonomics & Safety*, 481–485.
- Caffier, P. P., Erdmann, U., & Ullsperger, P. (2003). Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure. *European Journal of Applied Physiology*, 89(3–4), 319–325. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0807-5>
- Cain, B. (2007). A Review of the Mental Workload Literature. *Defence Research and Development Toronto (Canada)*, 1998, 4-1-4–34.
- Campbell, F. W., & Westheimer, G. (1959). Factors influencing accommodation responses of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 49(6), 568–571. <https://doi.org/10.1364/JOSA.49.000568>
- Campbell, F. W., & Westheimer, G. (1960). Dynamics of accommodation responses of the human eye. *The Journal of Physiology*, 151(2), 285–295. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1960.sp006438>
- Carbone, M., Piazza, R., & Condino, S. (2020). Commercially Available Head-Mounted Displays Are Unsuitable for Augmented Reality Surgical Guidance: A Call for Focused Research for Surgical Applications. In *Surgical Innovation* (Vol. 27, Issue 3, pp. 254–255). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/1553350620903197>
- Caricato, P., Colizzi, L., Gnoni, M. G., Grieco, A., Guerrieri, A., & Lanzilotto, A. (2014). Augmented reality applications in manufacturing: a multi-criteria decision

- model for performance analysis. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 754–759.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. In *Vision Research* (Vol. 51, Issue 13, pp. 1484–1525). <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>
- Casagrande, M., Barbato, M., Mereu, S., Martella, D., Marotta, A., Theeuwes, J., & Collinson, S. L. (2012). Inhibition of return: A “depth-blind” mechanism? *Acta Psychologica*, 140(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.02.011>
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992). *Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes*. 659–669 vol.2. <https://doi.org/10.1109/hicss.1992.183317>
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: Toward theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988–1000. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.4.988>
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). *Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX*.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications* (A. Colin (ed.)). Armand Colin.
- Charles, R. L., & Nixon, J. (2019). Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. In *Applied Ergonomics* (Vol. 74, pp. 221–232). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.028>
- Chen, A. H., & O’Leary, D. J. (1998). Validity and repeatability of the modified push-up method for measuring the amplitude of accommodation. *Clinical and Experimental Optometry*, 81(2), 63–71. <https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.1998.tb06628.x>
- Chen, S., Epps, J., Ruiz, N., & Chen, F. (2011). Eye activity as a measure of human mental effort in HCI. *International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings IUI*, 315–318. <https://doi.org/10.1145/1943403.1943454>
- Ciuffreda, J., K. (1991). Accommodation and its anomalies. *Visual Optics and Instrumentation*, 231–279.
- Claudia tom Dieck Timothy Jung, M., & Han, D.-I. (2016). Mapping Requirements for the Wearable Smart Glasses Augmented Reality Museum Application. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*, 7(3). <https://doi.org/10.1108/JHTT-09-2015-0036>
- Colle, H. A., & Reid, G. B. (1999). Double trade-off curves with different cognitive processing combinations: Testing the cancellation axiom of mental workload measurement theory. *Human Factors*, 41(1), 35–50. <https://doi.org/10.1518/001872099779577327>
- Condino, S., Carbone, M., Piazza, R., Ferrari, M., & Ferrari, V. (2019). Perceptual

- Limits of Optical See-Through Visors for Augmented Reality Guidance of Manual Tasks. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1–1.
<https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2914517>
- Connor, C. E., Egeth, H. E., & Yantis, S. (2004). Visual attention: Bottom-up versus top-down. In *Current Biology* (Vol. 14, Issue 19, pp. R850–R852). Cell Press.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.09.041>
- Cook, T., Phillips, N., Massey, K., Plopski, A., & Sandor, C. (2018). User Preference for SharpView-Enhanced Virtual Text during Non-Fixated Viewing. *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings*, 394–400. <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446058>
- Cooper, G. E., & Harper, R. P. (1969). The Use of Pilot Ratings in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities. *Advisory Group for Aerospace Research and Development Neuilly-Sur-Seine, AGARD-567*, 1–56.
- Cooper, J., & Jamal, N. (2012). Convergence insufficiency-a major review. In *Optometry (St. Louis, Mo.)* (Vol. 83, Issue 4, pp. 137–158).
- Cortes, G. (2018). *Contribution to the study of projection-based systems for industrial applications in mixed reality* [Université de Rennes 1].
- Costello, P. J., & Howarth, P. A. (1996). *The visual effects of immersion in four virtual environments* (Vol. 2000). VISERG Report 9604.
- Couyoumdjian, A., Di Nocera, F., & Ferlazzo, F. (2003). Functional representation of 3D space in endogenous attention shifts. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 56 A(1), 155–183.
<https://doi.org/10.1080/02724980244000215>
- Coyne, J., & Sibley, C. (2016). Investigating the use of two low cost Eye tracking systems for detecting pupillary response to changes in mental workload. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37–41.
<https://doi.org/10.1177/1541931213601009>
- Crawford, J., & Neal, A. (2006). A review of the perceptual and cognitive issues associated with the use of head-up displays in commercial aviation. In *International Journal of Aviation Psychology* (Vol. 16, Issue 1, pp. 1–19).
https://doi.org/10.1207/s15327108ijap1601_1
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64–72.
<https://doi.org/10.1145/129888.129892>
- Curatu, C., Hua, H., & Rolland, J. (2005). Projection-based head-mounted display with eye tracking capabilities. In J. M. Sasian, R. J. Koshel, & R. C. Juergens (Eds.), *Novel Optical Systems Design and Optimization VIII* (Vol. 5875, p. 58750J).

- SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.618715>
- Curcio, C. A., Sloan, K. R., Kalina, R. E., & Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology*, *292*(4), 497–523. <https://doi.org/10.1002/cne.902920402>
- Daniel, F., & Kapoula, Z. (2019). Induced vergence-accommodation conflict reduces cognitive performance in the Stroop test. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37778-y>
- de Waard, D. (1996). *The Measurement of Drivers ' Mental Workload*. Groningen.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some Theoretical Considerations. *Psychological Review*, *70*(1), 80–90. <https://doi.org/10.1037/h0039515>
- Di Stasi, L. L., Marchitto, M., Antolí, A., Baccino, T., & Cañas, J. J. (2010). Approximation of on-line mental workload index in ATC simulated multitasks. *Journal of Air Transport Management*, *16*(6), 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2010.02.004>
- Dixon, B. J., Daly, M. J., Chan, H. H. L., Vescan, A., Witterick, I. J., & Irish, J. C. (2014). Inattentive blindness increased with augmented reality surgical navigation. *American Journal of Rhinology and Allergy*, *28*(5), 433–437. <https://doi.org/10.2500/ajra.2014.28.4067>
- Dixon, B. J., Daly, M. J., Chan, H., Vescan, A. D., Witterick, I. J., & Irish, J. C. (2013). Surgeons blinded by enhanced navigation: the effect of augmented reality on attention. *Surgical Endoscopy*, *27*(2), 454–461. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2457-3>
- Drouot, M. (2020). *Mendeley Data - Impact of augmented reality on optometric parameters and fatigue symptoms*. <https://data.mendeley.com/datasets/rpsvy6b23g/1>
- Drouot, M., Le Bigot, N., Bolloc, J., Bricard, E., De Bougrenet, J., & Nourrit, V. (2021). The visual impact of augmented reality during an assembly task ☆. *Displays*, *66* (January), 101987. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2021.101987>
- Drouot, M., Le Bigot, N., De Bougrenet, J., & Nourrit, V. (2021). Effect of Context and Distance Switching on Visual Performances in Augmented Reality. *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 476–477. <https://doi.org/10.1109/VRW52623.2021.00120>
- Duchowski, A. T., Biele, C., Niedzielska, A., Krejtz, K., Krejtz, I., Kiefer, P., Raubal, M., & Giannopoulos, I. (2018). The Index of Pupillary activity: Measuring cognitive load vis-à-vis task difficulty with pupil oscillation. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2018-April*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173856>
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information.

- Journal of Experimental Psychology: General*, 113(4), 501–517.
<https://doi.org/10.1037/0096-3445.113.4.501>
- Eadie, A. S., Gray, L. S., Carlin, P., & Mon-Williams, M. (2000). Modelling adaptation effects in vergence and accommodation after exposure to a simulated Virtual Reality stimulus. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 20(3), 242–251.
<https://doi.org/10.1046/j.1475-1313.2000.00499.x>
- Egly, R., Driver, J., & Rafal, R. D. (1994). Shifting Visual Attention Between Objects and Locations: Evidence From Normal and Parietal Lesion Subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(2), 161–177.
- Eiberger, A., Kristensson, P. O., Mayr, S., Kranz, M., & Grubert, J. (2019). *Effects of Depth Layer Switching between an Optical See-Through Head-Mounted Display and a Body-Proximate Display*. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3357251.3357588>
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Lanzilotto, A. (2016). Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: An AHP based model. *Expert Systems with Applications*, 63, 187–197.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.07.006>
- Ellis, S. R., Breant, F., Menges, B., Jacoby, R., & Adelstein, B. D. (1997). Factors influencing operator interaction with virtual objects viewed via head-mounted see-through displays: viewing conditions and rendering latency. *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium*, 138–145.
<https://doi.org/10.1109/vrais.1997.583063>
- 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. <https://doi.org/10.1109/JDT.2005.858938>
- Emoto, Masaki, Nojiri, Y., & Okano, F. (2004). Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*, 25(2–3), 67–76.
<https://doi.org/10.1016/j.displa.2004.07.001>
- Ertem, M. C. (2005). An airborne synthetic vision system with HITS symbology using X-plane for a head up display. *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*, 2. <https://doi.org/10.1109/DASC.2005.1563432>
- Faure, V., Lobjois, R., & Benguigui, N. (2016). The effects of driving environment complexity and dual tasking on drivers' mental workload and eye blink behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 40, 78–90.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.04.007>
- Fei-Fei, L., Fergus, R., & Perona, P. (2004). Learning generative visual models from few training examples: An incremental bayesian approach tested on 101 object categories. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2004-Janua*(January).

- <https://doi.org/10.1109/CVPR.2004.383>
- Feng, J., Spence, I., & Pratt, J. (2007). Playing an action video game reduces gender differences in spatial cognition. *Psychological Science, 18*(10), 850–855.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x>
- Fincham, E. F., & Walton, J. (1957). The reciprocal actions of accommodation and convergence. *The Journal of Physiology, 137*(3), 488–508.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1957.sp005829>
- Fiorentino, M., De Amicis, R., Monno, G., & Stork, A. (2002). Spacedesign: A mixed reality workspace for aesthetic industrial design. *Proceedings - International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2002*, 86–96.
<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2002.1115077>
- Fjeld, M., & Voegtli, B. M. (2002). Augmented Chemistry: An interactive educational workbench. *Proceedings - International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2002*, 259–260. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2002.1115100>
- Foroughi, C. K., Sibley, C., & Coyne, J. T. (2017). Pupil size as a measure of within-task learning. *Psychophysiology, 54*(10), 1436–1443.
<https://doi.org/10.1111/psyp.12896>
- Fortuin, M. F., Lambooi, M. T., IJsselsteijn, W. A., Heynderickx, I., Edgar, D. F., & Evans, B. J. W. (2011). An exploration of the initial effects of stereoscopic displays on optometric parameters. *Ophthalmic and Physiological Optics, 31*(1), 33–44. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2010.00804.x>
- Fox, R., Todd, S., & Bettinger, L. A. (1975). Optokinetic nystagmus as an objective indicator of binocular rivalry. *Vision Research, 15*(7), 849–853.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(75\)90265-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(75)90265-5)
- Foy, H. J., & Chapman, P. (2018). Mental workload is reflected in driver behaviour, physiology, eye movements and prefrontal cortex activation. *Applied Ergonomics, 73*, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.06.006>
- Foyle, D., Sanford, B., & McCann, R. (1991). *Attentional issues in superimposed flight symbology*.
- Fraga-Lamas, P., Fernández-Caramés, T. M., Blanco-Novoa, Ó., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 13358–13375).
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
- Frey, J., Pommereau, L., Lotte, F., & Hachet, M. (2014). Assessing the zone of comfort in stereoscopic displays using EEG. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2041–2046*. <https://doi.org/10.1145/2559206.2581191>
- Friedman, D. S., Repka, M. X., Katz, J., Giordano, L., Ibrionke, J., Hawse, P., & Tielsch, J. M. (2009). Prevalence of Amblyopia and Strabismus in White and

- African American Children Aged 6 through 71 Months. The Baltimore Pediatric Eye Disease Study. *Ophthalmology*, 116(11).
<https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2009.04.034>
- Friedrich, W. (2002). ARVIKA-augmented reality for development, production and service. *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 3–4. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2002.1115059>
- Frigo, M. A., Silva, E. C. C. da, & Barbosa, G. F. (2016). Augmented Reality in Aerospace Manufacturing: A Review. *Journal of Industrial and Intelligent Information*. <https://doi.org/10.18178/jiii.4.2.125-130>
- Fry, G., & Haines, H. (1940). Tait's analysis of the accommodation-convergence relationship. *Optometry and Vision Science*, 17(9), 393–401.
- Funk, M., Bachler, A., Bachler, L., Kosch, T., Heidenreich, T., & Schmidt, A. (2017). Working with augmented reality? A long-term analysis of in-situ instructions at the assembly workplace. *ACM International Conference Proceeding Series, Part F1285*, 222–229. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056548>
- Funk, M., Kosch, T., Greenwald, S. W., & Schmidt, A. (2015). A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks. *ACM International Conference Proceeding Series, 30-Novembe*, 253–257.
<https://doi.org/10.1145/2836041.2836067>
- Funk, M., Kosch, T., & Schmidt, A. (2016). Interactive worker assistance: Comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions. *UbiComp 2016 - Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 934–939.
<https://doi.org/10.1145/2971648.2971706>
- Gabbard, J. L., Mehra, D. G., & Swan, J. E. (2019). Effects of ar display context switching and focal distance switching on human performance. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(6), 2228–2241.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2832633>
- Gaffary, Y., Le Gouis, B., Marchal, M., Argelaguet, F., Arnaldi, B., & Lecuyer, A. (2017). AR Feels “Softer” than VR: Haptic Perception of Stiffness in Augmented versus Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(11), 2372–2377. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2735078>
- Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. (2015). Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*, 23(6), 778–798. <https://doi.org/10.1080/10494820.2013.815221>
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. In *Trends in Neurosciences* (Vol. 15, Issue 1, pp. 20–25). Elsevier Current

- Trends. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). *Workload: An examination of the concept.* (& J. P. T. In K. R. Boff, L. Kaufman (ed.)).
- Granholm, E., Asarnow, R. F., Sarkin, A. J., & Dykes, K. L. (1996). Pupillary responses index cognitive resource limitations. *Psychophysiology*, *33*(4), 457–461. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb01071.x>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2019). Corrigendum: Action-Video-Game Experience Alters the Spatial Resolution of Vision (*Psychological Science*, (2007), *18*, (88–94), 10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x). In *Psychological Science* (Vol. 30, Issue 12, p. 1790). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/0956797619889044>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2020). Corrigendum to “Enumeration versus object tracking: Insights from video game players.” [*Cognition* 101 (2006) 217–245](S0010027705001873)(10.1016/j.cognition.2005.10.004). In *Cognition* (Vol. 198). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104198>
- Green, C. Shawn, & Bavelier, D. (2006). Effect of action video games on the spatial distribution of visuospatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(6), 1465–1478. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.6.1465>
- Guo, W., Tian, X., Tan, J., & Wang, L. (2016). *Change in Heart Rate Variability Indexes due to high driving workload in turning left at the intersection in real road environment.* 804–807. <https://doi.org/10.2991/icmemtc-16.2016.158>
- Guo, W., Tian, X., Tan, J., Zhao, L., & Li, L. (2017). Driver’s mental workload estimation based on empirical physiological indicators. *Proceedings - 2016 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, YAC 2016*, 344–347. <https://doi.org/10.1109/YAC.2016.7804916>
- Häkkinen, J. (2004). 61.3: Invited Paper: A Virtual Display for Mobile Use. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, *35*(1), 1586. <https://doi.org/10.1889/1.1825789>
- Häkkinen, J., Pölönen, M., Takatalo, J., & Nyman, G. (2006). Simulator sickness in virtual display gaming: A comparison of stereoscopic and non-stereoscopic situations. *ACM International Conference Proceeding Series*, *159*, 227–229. <https://doi.org/10.1145/1152215.1152263>
- Han, S., Wan, X., & Humphreys, G. W. (2005). Shifts of spatial attention in perceived 3-D space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, *58*(4), 753–764. <https://doi.org/10.1080/02724980443000548>
- Haniff, D. J., & Baber, C. (2003). User evaluation of augmented reality systems. *Proceedings on Seventh International Conference on Information Visualization*,

2003. *IV 2003.*, 505–511. <https://doi.org/10.1109/IV.2003.1218032>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, *52*(C), 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Heath, G. G. (1956). Components of Accommodation. *Optometry and Vision Science*, *33*(11), 569–579. <https://doi.org/10.1097/00006324-195611000-00001>
- Henderson, S., & Feiner, S. (2011). Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *17*(10), 1355–1368. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.245>
- Hershberger, M. L., & et al. (1975). *Binocular rivalry in helmet-mounted display*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA013838>
- Hicks, T. G., & Wierwille, W. W. (1979). Comparison of Five Mental Workload Assessment Procedures in a Moving-Base Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *21*(2), 129–143. <https://doi.org/10.1177/001872087902100201>
- Hill, S. G., Iavecchia, H. P., Byers, J. C., Bittner, A. C., Zaklad, A. L., & Christ, R. E. (1992). Comparison of four subjective workload rating scales. *Human Factors*, *34*(4), 429–439. <https://doi.org/10.1177/001872089203400405>
- Hirota, M., Kanda, H., Endo, T., Miyoshi, T., Miyagawa, S., Hirohara, Y., Yamaguchi, T., Saika, M., Morimoto, T., & Fujikado, T. (2019). Comparison of visual fatigue caused by head-mounted display for virtual reality and two-dimensional display using objective and subjective evaluation. *Ergonomics*, *62*(6), 759–766. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1582805>
- 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. <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- Hofstetter, H. W. (1945). The zone of clear single binocular vision. *Optometry and Vision Science*, *22*(7), 301–333. <https://doi.org/10.1097/00006324-194507000-00001>
- Hogervorst, M. A., Brouwer, A. M., & van Erp, J. B. F. (2014). Combining and comparing EEG, peripheral physiology and eye-related measures for the assessment of mental workload. *Frontiers in Neuroscience*, *8*(OCT), 322. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00322>
- Hou, L., & Wang, X. (2013). A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks: A focus on differences in gender. *Automation in Construction*, *32*, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.007>
- Hou, L., Wang, X., Bernold, L., & Love, P. E. D. (2013). Using animated augmented reality to cognitively guide assembly. *Journal of Computing in Civil Engineering*,

- 27(5), 439–451. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000184](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000184)
- Hou, L., Wang, X., & Truijens, M. (2015). Using augmented reality to facilitate piping assembly: An experiment-based evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000344](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000344)
- Howarth, P. A., & Costello, P. J. (1997). The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. *Displays*, 18(2), 107–116. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(97\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(97)00011-5)
- Howarth, Peter Alan, & Costello, P. J. (1997). The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. *Displays*, 18(2), 107–116. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(97\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(97)00011-5)
- Howell, D. C. (2008). *Fundamental statistics for the behavioral sciences* (C. : T. Belmont (ed.)).
- Hua, H., & Gao, C. (2007). Design of a bright polarized head-mounted projection display. *Applied Optics*, 46(14), 2600–2610. <https://doi.org/10.1364/AO.46.002600>
- Huckauf, A., Urbina, M. H., Böckelmann, I., Schega, L., Mecke, R., Grubert, J., Doil, F., & Tümler, J. (2010). Perceptual issues in optical-see-through displays. *Proceedings - APGV 2010: Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, 41–48. <https://doi.org/10.1145/1836248.1836255>
- Hung, G. K., Ciuffreda, K. J., Khosroyani, M., & Jiang, B.-C. (2002). Models of Accommodation. In *Models of the Visual System* (pp. 287–339). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5865-8_8
- Itti, L. (2000). *Models of bottom-up and top-down visual attention* [California Institute of Technology Pasadena].
- Jafari, M. J., Zaeri, F., Jafari, A. H., Payandeh Najafabadi, A. T., Al-Qaisi, S., & Hassanzadeh-Rangi, N. (2020). Assessment and monitoring of mental workload in subway train operations using physiological, subjective, and performance measures. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 30(3), 165–175. <https://doi.org/10.1002/hfm.20831>
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology* (Henry Holt). JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1423317>
- Järvenpää, T., & Pölonen, M. (2009). 36.1: Advances in Near-To-Eye Display Optical Characterization. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 40(1), 507. <https://doi.org/10.1889/1.3256827>
- Jetter, J., Eimecke, J., & Rese, A. (2018). Augmented reality tools for industrial applications: What are potential key performance indicators and who benefits? *Computers in Human Behavior*, 87, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.054>
- Jung, T., Tom Dieck, M. C., Lee, H., & Chung, N. (2016). *Effects of Virtual Reality*

- and Augmented Reality on Visitor Experiences in Museum.* 621–635.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-28231-2-45>
- Kade, D., Akşit, K., Ürey, H., & Özcan, O. (2015). Head-mounted mixed reality projection display for games production and entertainment. *Personal and Ubiquitous Computing*, 19(3), 509–521. <https://doi.org/10.1007/s00779-015-0847-y>
- Kahneman, D. (1973). Attention and effort. *Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall, Inc.*, 246.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1999). Managing Split-attention and Redundancy in Multimedia Instruction. *Applied Cognitive Psychology*, 13(4), 351–371. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199908\)13:4<351::AID-ACP589>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199908)13:4<351::AID-ACP589>3.0.CO;2-6)
- Kassner, M., Patera, W., & Bulling, A. (2014). Pupil: An open source platform for pervasive eye tracking and mobile gaze-based interaction. *UbiComp 2014 - Adjunct Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 1151–1160.
<https://doi.org/10.1145/2638728.2641695>
- Kellogg, R. T. (1990). Effectiveness of Prewriting Strategies as a Function of Task Demands. *The American Journal of Psychology*, 103(3), 327.
<https://doi.org/10.2307/1423213>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220.
https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kim, H., & Gabbard, J. L. (2019). Assessing Distraction Potential of Augmented Reality Head-Up Displays for Vehicle Drivers. *Human Factors*, 18720819844845.
<https://doi.org/10.1177/0018720819844845>
- Kim, J., Kane, D., & Banks, M. S. (2014). The rate of change of vergence-accommodation conflict affects visual discomfort. *Vision Research*, 105, 159–165.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.10.021>
- Kim, S. H., Suh, Y. W., Yun, C., Yoo, E. J., Yeom, J. H., & Cho, Y. A. (2013). Influence of stereopsis and abnormal binocular vision on ocular and systemic discomfort while watching 3D television. *Eye (Basingstoke)*, 27(11), 1243–1248.
<https://doi.org/10.1038/eye.2013.173>
- Kim, Seung Hyun, Suh, Y. W., Song, J. S., Park, J. H., Kim, Y. Y., Huh, K., Son, J., Kham, K., Jeong, T., & Pyo, K. S. (2012). Clinical research on the ophthalmic factors affecting 3D asthenopia. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 49(4), 248–253. <https://doi.org/10.3928/01913913-20120207-03>
- Kim, Seung Hyun, Suh, Y. W., Yun, C. M., Yoo, E. J., Yeom, J. H., & Cho, Y. A.

- (2013). 3D asthenopia in horizontal deviation. *Current Eye Research*, 38(5), 614–619. <https://doi.org/10.3109/02713683.2013.767352>
- Kim, Seungjun, Kim, H., Eom, S., Mahalik, N. P., & Ahn, B. (2006). A reliable new 2-stage distributed interactive TGS system based on GIS database and augmented reality. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E89-D(1), 98–105. <https://doi.org/10.1093/ietisy/e89-d.1.98>
- Kim, Sunwook, Nussbaum, M. A., & Gabbard, J. L. (2019). Influences of augmented reality head-worn display type and user interface design on performance and usability in simulated warehouse order picking. *Applied Ergonomics*, 74, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.026>
- Klein, R. M. (2000). Inhibition of return. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 4, Issue 4, pp. 138–147). Elsevier Current Trends. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01452-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01452-2)
- Klein, R. M., & MacInnes, W. J. (1999). Inhibition of return is a foraging facilitator in visual search. *Psychological Science*, 10(4), 346–352. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00166>
- Klingner, J., Tversky, B., & Hanrahan, P. (2011). Effects of visual and verbal presentation on cognitive load in vigilance, memory, and arithmetic tasks. *Psychophysiology*, 48(3), 323–332. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01069.x>
- Knight, J.F., Williams, D. D., Arvanitis, T. N., Chris, B., Wichmann, A., Wittkaemper, M., Herbst, I., & Sotiriou, S. (2005). Wearability assessment of a mobile augmented reality system. *Proc. 11th Int. Conf. on Virtual Systems and MultiMedia*.
- Knight, James F, & Baber, C. (2005). A Tool to Assess the Comfort of Wearable Computers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(1), 77–91. <https://doi.org/10.1518/0018720053653875>
- Knorr, S., Jena, E.-A.-H., Sikora, T., Knorr, S., Ide, K., Kunter, M., & Sikora, T. (2011). *Basic rules for good 3D and the avoidance of visual discomfort in stereoscopic vision*.
- Kooi, F. L. (1997). Visual strain : a comparison of monitors and head-mounted displays. In J. Bares, C. T. Bartlett, P. A. Delabastita, J. L. Encarnacao, N. V. Tabiryan, P. E. Trahanias, & A. R. Weeks (Eds.), *Imaging Sciences and Display Technologies* (Vol. 2949, pp. 162–171). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.266346>
- 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. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181adff42>
- Kress, B. C. (2019). *Optical waveguide combiners for AR headsets: features and*

- limitations*. 11062, 17. <https://doi.org/10.1117/12.2527680>
- Kress, B. C., & Cummings, W. J. (2017). Optical architecture of HoloLens mixed reality headset. *Digital Optical Technologies 2017*, 10335, 103350K. <https://doi.org/10.1117/12.2270017>
- Kress, B., & Starner, T. (2013). A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics. *Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV*, 8720, 87200A. <https://doi.org/10.1117/12.2015654>
- Kruger, J. L., & Steyn, F. (2014). Subtitles and eye tracking: Reading and performance. *Reading Research Quarterly*, 49(1), 105–120. <https://doi.org/10.1002/rrq.59>
- Kruger, P. B., & Pola, J. (1986). Stimuli for accommodation: Blur, chromatic aberration and size. *Vision Research*, 26(6), 957–971. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(86\)90153-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(86)90153-7)
- Lamard, M., Ferragut, S., Hugny-Larroque, C., De Bougrenet De La Tournay, J. L., & Cochener, B. (2016). Évaluation d'une plateforme d'orthoptie numérique 3D. *Journal Français d'Ophthalmologie*, 39(5), 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.jfo.2016.01.004>
- Lambooij, M., Fortuin, M., Ijsselsteijn, W. A., & Heynderickx, I. (2009). Measuring visual discomfort associated with 3D displays. *Stereoscopic Displays and Applications XX*, 7237(February 2009), 72370K. <https://doi.org/10.1117/12.805977>
- Lambooij, M. T. M., Ijsselsteijn, W. A., & Heynderickx, I. (2007). Visual discomfort in stereoscopic displays: a review. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV*, 6490, 64900I. <https://doi.org/10.1117/12.705527>
- Lambooij, M., Fortuin, M., Ijsselsteijn, W. A., & Heynderickx, I. (2009). Measuring visual discomfort associated with 3D displays. *Stereoscopic Displays and Applications XX*, 7237, 72370K. <https://doi.org/10.1117/12.805977>
- Lambooij, Marc, 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), 030201. <https://doi.org/10.2352/j.imagingsci.technol.2009.53.3.030201>
- Laviola, J. J., Williamson, B. M., Brooks, C., Veazanchin, S., Sottolare, R., & Garrity, P. (2015). *Using Augmented Reality to Tutor Military Tasks in the Wild*.
- Lavric, T., Bricard, E., Preda, M., & Zaharia, T. (2021). Exploring Low-Cost Visual Assets for Conveying Assembly Instructions in AR. *2021 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*.
- Léger, S. (2014). *Apprécier les qualités organoleptiques des aliments (CCDMD)*.

- Lemercier, C., & Cellier, J. M. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile: Inattention, distraction et interférence. In *Travail Humain* (Vol. 71, Issue 3, pp. 271–296). <https://doi.org/10.3917/th.713.0271>
- Leu, M. C., Elmaraghy, H. A., Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Lanzetta, M., Putz, M., Zhu, W., & Bernard, A. (2013). CAD model based virtual assembly simulation, planning and training. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *62*(2), 799–822. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.005>
- Leys, C., & Schumann, S. (2010). A nonparametric method to analyze interactions: The adjusted rank transform test. *Journal of Experimental Social Psychology*, *46*(4), 684–688. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2010.02.007>
- Lo, J. C., Sehic, E., & Meijer, S. A. (2017). Measuring Mental Workload With Low-Cost and Wearable Sensors: Insights Into the Accuracy, Obtrusiveness, and Research Usability of Three Instruments. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *11*(4), 323–336. <https://doi.org/10.1177/1555343417716040>
- Loch, F., Quint, F., & Brishtel, I. (2016). Comparing video and augmented reality assistance in manual assembly. *Proceedings - 12th International Conference on Intelligent Environments, IE 2016*, 147–150. <https://doi.org/10.1109/IE.2016.31>
- Logothetis, N. K., & Schall, J. D. (1990). Binocular motion rivalry in macaque monkeys: Eye dominance and tracking eye movements. *Vision Research*, *30*(10), 1409–1419. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(90\)90022-D](https://doi.org/10.1016/0042-6989(90)90022-D)
- Lucignano, L., & Dillenbourg, P. (2017). Double Reality: Shifting the Gaze between the Physical Object and Its Digital Representation. *Adjunct Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2017*, 137–142. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.50>
- Lupiáñez, J., Klein, R. M., & Bartolomeo, P. (2006). Inhibition of return: Twenty years after. In *Cognitive Neuropsychology* (Vol. 23, Issue 7, pp. 1003–1014). Psychology Press. <https://doi.org/10.1080/02643290600588095>
- Luque-Casado, A., Perales, J. C., Cárdenas, D., & Sanabria, D. (2016). Heart rate variability and cognitive processing: The autonomic response to task demands. *Biological Psychology*, *113*, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.11.013>
- Macchiarella, N. D., Liu, D., Gangadharan, S. N., Vincenzi, D. A., & Majoros, A. E. (2005). Augmented Reality as a Training Medium for Aviation/Aerospace Application. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *49*(25), 2174–2178. <https://doi.org/10.1177/154193120504902512>
- Maddox, E. (1893). *The Clinical Use of Prisms: and The Decentering of Lenses* (K. & C. Simpkin, Marshall, Hamilton (ed.)).
- Maltz, M., & Shinar, D. (1999). Eye movements of younger and older drivers. *Human Factors*, *41*(1), 15–25. <https://doi.org/10.1518/001872099779577282>

- Marquart, G., Cabrall, C., & de Winter, J. (2015). Review of Eye-related Measures of Drivers' Mental Workload. *Procedia Manufacturing*, 3, 2854–2861. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.783>
- Marran, L., & Schor, C. M. (2000). Binocular Accommodation. In *Accommodation and Vergence Mechanisms in the Visual System* (pp. 245–256). Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7586-8>
- Marran, Lynn, & Schor, C. M. (1998). Lens induced aniso-accommodation. *Vision Research*, 38(22), 3601–3619. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00064-9)
- Marshall, S. P. (2002). The Index of Cognitive Activity: Measuring cognitive workload. *IEEE Conference on Human Factors and Power Plants*, 75–79. <https://doi.org/10.1109/hfpp.2002.1042860>
- Marshev, V. (2021). Human vision and virtual reality How virtual reality can impact the visual system and help studying it. IMT - Atlantique.
- Martens, M. H., & van Winsum, W. (2000). Measuring distraction: the peripheral detection task. *TNO Human Factors, March*, 1–7.
- Martin, C. (2013). *La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens en-route : apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR* [Université Toulouse le Mirail].
- Martin, C., Cegarra, J., & Averty, P. (2011). Analysis of mental workload during en-route air traffic control task execution based on eye-tracking technique. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6781 LNAI, 592–597. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21741-8_63
- Martins, R., Rolland, J. P., Shaoulov, V., Ha, Y., & Rolland, J. (2004). *Projection-based head-mounted displays for wearable computers*. <https://doi.org/10.1117/12.542778>
- Maruff, P., Yucel, M., Danckert, J., Stuart, G., & Currie, J. (1999). Facilitation and inhibition arising from the exogenous orienting of covert attention depends on the temporal properties of spatial cues and targets. *Neuropsychologia*, 37(6), 731–744. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00067-0)
- May, J. G., Kennedy, R. S., Williams, M. C., Dunlap, W. P., & Brannan, J. R. (1990). Eye movement indices of mental workload. *Acta Psychologica*, 75(1), 75–89. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(90\)90067-P](https://doi.org/10.1016/0001-6918(90)90067-P)
- Mays, L. (2008). Accommodation–Vergence Interactions. In *Encyclopedia of Neuroscience* (pp. 10–10). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_31
- McCann, R. S., & Foyle, D. C. (1994). Superimposed symbology: Attentional problems and design solutions. *SAE Technical Papers, June*. <https://doi.org/10.4271/942111>

- McCann, R. S., Foyle, D. C., & Johnston, J. C. (1993). Attentional limitations with heads up displays. *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Human Factors Society*, 1345–1349.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors*, *54*(5), 762–771. <https://doi.org/10.1177/0018720812442087>
- Midha, S., Maior, H. A., Wilson, M. L., & Sharples, S. (2021). Measuring Mental Workload Variations in Office Work Tasks using fNIRS. *International Journal of Human Computer Studies*, *147*, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102580>
- Miles, F. A., Judge, S. J., & Optican, L. M. (1987). Optically induced changes in the couplings between vergence and accommodation. *The Journal of Neuroscience*, *7*(8), 2576.
- Miles, F. A., & Optican, L. M. (1987). Optically Induced Changes in the Couplings Between Vergence and Accommodation. In *The Journal of Neuroscience* (Vol. 7, Issue 8).
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays Using Stereoscopic Video for Defence Teleoperation View project paramedics response bags View project a taxonomy of mixed reality visual displays. In *IEICE Transactions on Information Systems* (Issue 12).
- Miller, S. (2001). *Literature Review Workload measures* (Issue August).
- Min, J. S., Kwak, G., & Hwang, W. (2020a). Comparison among types of assembly manuals based on paper, video and augmented reality. *ICIC Express Letters*, *14*(3), 303–310. <https://doi.org/10.24507/icicel.14.03.303>
- Min, J. S., Kwak, G., & Hwang, W. (2020b). Comparison among types of assembly manuals based on paper, video and augmented reality. *ICIC Express Letters*, *14*(3), 303–310. <https://doi.org/10.24507/icicel.14.03.303>
- Mirza, K., & Sarayedine, K. (2012). Key challenges to affordable see through wearable displays: The missing link for mobile AR mass deployment. *Proceedings of the International Display Workshops*, *3*, 1696–1697. <https://doi.org/10.1117/12.2018184>
- Miura, T. (1990). Active function of eye movement and useful field of view in a realistic setting. In *From Eye to Mind: Information Acquisition in Perception, Search, and Reading* (pp. 119–127).
- Miyake, S. (2001). Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures. *International Journal of Psychophysiology*, *40*(3), 233–238. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00191-4)
- 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.
<https://doi.org/10.1518/001872098779480622>
- Mon-Williams, M., Wann, 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. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1993.tb00496.x>
- Mordi, J. A., & Ciuffreda, K. J. (2004). Dynamic aspects of accommodation: Age and presbyopia. *Vision Research*, 44(6), 591–601.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2003.07.014>
- Morgan, M. W. (1944). Analysis of clinical data. *Optometry and Vision Science*, 21(12), 477–491. <https://doi.org/10.1097/00006324-194412000-00001>
- Nardelli, M., Condino, S., Ghiasi, S., Callara, A. L., Rho, G., Carbone, M., Ferrari, V., Scilingo, E. P., & Greco, A. (2020). *Recognizing AR-guided manual tasks through autonomic nervous system correlates: a preliminary study*.
- Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 657–679. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- Neisser, U., & Becklen, R. (1975). Selective Looking: Attending to Visually Specified Events. In *Cognitive Psychology* (Vol. 7).
- Neumann, U., & Majoros, A. (1998). Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance. *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium*, 4–11.
<https://doi.org/10.1109/vrais.1998.658416>
- Neveu, P. (2012). *L'impact des dispositifs de visualisation en relief sur les composantes oculomotrices d'accommodation et de vergence*. Paris 8.
- Neveu, P., Philippe, M., Priot, A.-E., Fuchs, P., & Roumes, C. (2012). Vergence tracking: a tool to assess oculomotor performance in stereoscopic displays. *Journal of Eye Movement Research*, 5(2). <https://doi.org/10.16910/JEMR.5.2.1>
- Neveu, P., Priot, A. E., Plantier, J., & Roumes, C. (2010). Short exposure to telestereoscope affects the oculomotor system. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30(6), 806–815. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2010.00763.x>
- Neveu, P., Roumes, C., Philippe, M., Fuchs, P., & Priot, A.-E. (2016). Stereoscopic Viewing Can Induce Changes in the CA/C Ratio. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 57(10), 4321. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-18854>
- Nichols, S. (1999). Physical ergonomics of virtual environment use. *Applied Ergonomics*, 30(1), 79–90. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00045-3)
- Norman, D. A. (1968). Toward a theory of memory and attention. *Psychological*

- Review*, 75(6), 522–536. <https://doi.org/10.1037/h0026699>
- Olfers, K. J. F., & Band, G. P. H. (2018). Game-based training of flexibility and attention improves task-switch performance: near and far transfer of cognitive training in an EEG study. *Psychological Research*, 82(1), 186–202. <https://doi.org/10.1007/s00426-017-0933-z>
- Oohira, A., & Ochiai, M. (1996). Influence on visual function by a stereoscopic TV programme with binocular liquid crystal shutter and Hi-Vision TV display. *Ergonomics*, 39(11), 1310–1314. <https://doi.org/10.1080/00140139608964550>
- Orden, K. Van, Makeig, S., Jung, T.-P., Van Orden, K. F., & Limbert, W. (2001). Eye Activity Correlates of Workload during a Visuospatial Memory Task. *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(1), 111–121. <https://doi.org/10.1518/001872001775992570>
- Oshima, K., Moser, K. R., Rompapas, D. C., Swan, J. E., Ikeda, S., Yamamoto, G., Taketomi, T., Sandor, C., & Kato, H. (2016). SharpView: Improved clarity of defocussed content on optical see-through head-mounted displays. *Proceedings - IEEE Virtual Reality, 2016-July*, 253–254. <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504749>
- Oshima, K., Rompapas, D. C., Moser, K., Swan, E., Ikeda, S., Yamamoto, G., Taketomi, T., Sandor, C., & Kato, H. (2015). SharpView: Improved Legibility of Defocussed Content on Optical See-Through Head-Mounted Displays. *Demo under Submission for: ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*.
- Pathai, S., Cumberland, P. M., & Rahi, J. S. (2010). Prevalence of and early-life influences on childhood strabismus: Findings from the millennium cohort study. *Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine*, 164(3), 250–257. <https://doi.org/10.1001/archpediatrics.2009.297>
- Patterson, R., Winterbottom, M., Pierce, B., & Fox, R. (2007). Binocular rivalry and head-worn displays. *Human Factors*, 49(6), 1083–1096. <https://doi.org/10.1518/001872007X249947>
- Paubel, P., Averty, P., & Raufaste, E. (2013). Effects of an Automated Conflict Solver on the Visual Activity of Air Traffic Controllers. *Researchgate.Net*, 23(2), 181–196. <https://doi.org/10.1080/10508414.2013.772841>
- Peinkhofer, C., Knudsen, G. M., Moretti, R., & Kondziella, D. (2019). Cortical modulation of pupillary function: Systematic review. *PeerJ Computer Science*, 2019(7). <https://doi.org/10.7717/peerj.6882>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00397-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00397-0)
- Percival, A. S. (1892). The relation of convergence to accommodation and its practical

- bearing. *Ophthalm. Rev*, 11, 313–328. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10011335117/>
- Pinto, Y., van der Leij, A. R., Sligte, I. G., Lamme, V. A. F., & Scholte, H. S. (2013). Bottom-up and top-down attention are independent. *Journal of Vision*, 13(3), 16. <https://doi.org/10.1167/13.3.16>
- Piolat, A., Olive, T., Roussey, J. Y., Thunin, O., & Ziegler, J. C. (1999). SCRIPTKELL: A tool for measuring cognitive effort and time processing in writing and other complex cognitive activities. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31(1), 113–121. <https://doi.org/10.3758/BF03207701>
- Pölonen, M., Järvenpää, T., & Häkkinen, J. (2012). Reading e-books on a near-to-eye display: Comparison between a small-sized multimedia display and a hard copy. *Displays*, 33(3), 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2012.06.002>
- Posner, M., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting of attention. *Attention and Performance, January 1984*, 531–556.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. In *Annual Review of Neuroscience* (Vol. 13, pp. 25–42). <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Posner, Michael I., Snyder, C. R. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. In *Human Perception: Institutional Performance and Reform in Australia* (pp. 43–57). <https://doi.org/10.4324/9781351156288-10>
- Posner, Michael I. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., Lamantia, A.-S., & White, L. E. (2019). *Neurosciences* (De Boeck S).
- Quandt, M., Knoke, B., Gorltd, C., Freitag, M., & Thoben, K. D. (2018). General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications. *Procedia CIRP*, 72, 1130–1135. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.061>
- Rafal, R. D., & Posner, M. I. (1987). Deficits in human visual spatial attention following thalamic lesions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 84(20), 7349–7353. <https://doi.org/10.1073/pnas.84.20.7349>
- Rafal, R., & Henik, A. (1994). The neurology of inhibition: Integrating controlled and automatic processes. In *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 1–51). <https://psycnet.apa.org/record/1994-97487-001>
- Raskar, R., Welch, G., & Fuchs, H. (1998). Spatially Augmented Reality. In *First International Workshop on Augmented Reality*.
- Raufaste, E., Daurat, A., Mélan, C., & Ribet-Van De Weerd, C. (2004). Aspects intensifs de la cognition en situation de travail. *Psychologie Ergonomique* :

- Tendances Actuelles*, 175–199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3917/puf.hocj.2004.01.0175>
- Rauschnabel, P. A., Rossmann, A., & tom Dieck, M. C. (2017). An adoption framework for mobile augmented reality games: The case of Pokémon Go. *Computers in Human Behavior*, 76, 276–286.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.07.030>
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(1), 31–43. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.6.1.31>
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(2), 119–137. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.2.119>
- Recarte, M. Á., Pérez, E., Conchillo, Á., & Nunes, L. M. (2008a). Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating. *Spanish Journal of Psychology*, 11(2), 374–385. <https://doi.org/10.1017/s1138741600004406>
- Recarte, M. Á., Pérez, E., Conchillo, Á., & Nunes, L. M. (2008b). Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating. *Spanish Journal of Psychology*, 11(2), 374–385. <https://doi.org/10.1017/s1138741600004406>
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The Subjective Workload Assessment Technique: A Scaling Procedure for Measuring Mental Workload. *Advances in Psychology*, 52(C), 185–218. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62387-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62387-0)
- Roberts, D. C., Snarski, S., Sherrill, T., Menozzi, A., Clipp, B., & Russler, P. (2012). Soldier-worn augmented reality system for tactical icon visualization. *Head- and Helmet-Mounted Displays XVII; and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI*, 8383, 838305.
<https://doi.org/10.1117/12.921290>
- Rolland, J. P., & Fuchs, H. (2000). Optical Versus Video See-Through Head-Mounted Displays in Medical Visualization. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(3), 287–309. <https://doi.org/10.1162/105474600566808>
- Roumes, C., Fornette, M., Valot, C., & Le Blaye, P. (2001). *Symbologie des collimateurs tête haute (HUD) : Etude pré réglementaire pour le SFACT*.
- Rousseau, B. (2002). Asthénopie et disparité de fixation. *Journal Français d'orthoptique*, 34, 113–119.
- 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, 255–260. [http://dx.doi.org/10.1016/0141-9382\(94\)90073-6](http://dx.doi.org/10.1016/0141-9382(94)90073-6)
- Rushton, Simon, 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. [https://doi.org/10.1016/0141-9382\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0141-9382(94)90073-6)
- Saito, S. (1992). Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movements? *Ergonomics*, 35(5–6), 607–615. <https://doi.org/10.1080/00140139208967840>
- Salesse, C. (2017). Physiologie du signal visuel rétinien : de la phototransduction jusqu'au cycle visuel. *Journal Français d'Ophtalmologie*, 40(3), 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.jfo.2016.12.006>
- Scheiman, M., & Wick, B. (2014). *Clinical Management of Binocular Vision: Heterophoric, Accommodative, and Eye Movement Disorders* (Vol. 91, Issue 3). Lippincott Williams & Wilkins, Houston, T. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000214>
- Schmalsteig, D., & Hollerer, T. (2016). Augmented reality : principles and practice. *ACM SIGGRAPH 2016 Courses on - SIGGRAPH '16*, 1. <https://doi.org/10.1145/2897826.2927365>
- Schor, C. M. (1979). The relationship between fusional vergence eye movements and fixation disparity. *Vision Research*, 19(12), 1359–1367. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90208-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(79)90208-6)
- Schowengerdt, B. T., & Seibel, E. J. (2006). True 3-D scanned voxel displays using single or multiple light sources. *Journal of the Society for Information Display*, 14(2), 135. <https://doi.org/10.1889/1.2176115>
- Schwerdtfeger, B., Reif, R., Günthner, W. A., Klinker, G., Hamacher, D., Schega, L., Böckelmann, I., Doil, F., & Tümler, J. (2009). Pick-by-Vision: A first stress test. *Science and Technology Proceedings - IEEE 2009 International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2009*, 115–124. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2009.5336484>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.005>
- Sheedy, J., & Bergstrom, N. (2002). Performance and comfort on near-eye computer displays. *Optometry and Vision Science*, 79(5), 306–312. <https://doi.org/10.1097/00006324-200205000-00010>
- Shen, Y., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2010). Augmented reality for collaborative product design and development. *Design Studies*, 31(2), 118–145. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.11.001>
- 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), 11–11. <https://doi.org/10.1167/11.8.11>
- Shibata, Takashi. (2002). Head mounted display. *Displays*, 23(1–2), 57–64.

- [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(02)00010-0)
- Shibata, Takashi, Kim, J., Hoffman, D. M., & Banks, M. S. (2011). Visual discomfort with stereo displays: effects of viewing distance and direction of vergence-accommodation conflict. In A. J. Woods, N. S. Holliman, & N. A. Dodgson (Eds.), *Stereoscopic Displays and Applications XXII* (Vol. 7863, p. 78630P). SPIE.
<https://doi.org/10.1117/12.872347>
- Shrager, J. J. (1978). *Head-Up Displays: A Literature Review and Analysis with an Annotated Bibliography*.
- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). *Gorillas in our midst: sustained inattentional blindness for dynamic events*. 16.
- Sirevaag, E. J., Kramer, A. F., Wickens, C. D., Reisweber, M., Strayer, D. L., & Grenell, J. F. (1993). Assessment of pilot performance and mental workload in rotary wing aircraft. *Ergonomics*, *36*(9), 1121–1140.
<https://doi.org/10.1080/00140139308967983>
- Smiley, A. (2005). What is distraction? *International Conference on Distracted Driving, 2005, Toronto, Ontario, Canada*.
- Sreenivasan, V., & Bobier, W. R. (2015). Increased onset of vergence adaptation reduces excessive accommodation during the orthoptic treatment of convergence insufficiency. *Vision Research*, *111*, 105–113.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.04.001>
- Stedmon, A. W., & Stone, R. J. (2001). Re-viewing reality: Human factors of synthetic training environments. *International Journal of Human Computer Studies*, *55*(4), 675–698. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0498>
- Stein, E. S. (1992). AIR TRAFFIC CONTROL VISUAL SCANNING. *Atlantic City International Airport: FAA Technical Center*.
- Serman, M. B., & Mann, C. A. (1995). Concepts and applications of EEG analysis in aviation performance evaluation. *Biological Psychology*, *40*(1–2), 115–130.
[https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05101-5](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05101-5)
- Stern, J. A., Walrath, L. C., & Goldstein, R. (1984). The Endogenous Eyeblink. *Psychophysiology*, *21*(1), 22–33. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1984.tb02312.x>
- Suárez-Warden, F., Mendivil, E. G., Rodríguez, C. A., & Garcia-Lumbreras, S. (2015). Assembly Operations Aided by Augmented Reality: An Endeavour toward a Comparative Analysis. *Procedia Computer Science*, *75*, 281–290.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.249>
- Sun, Z., Cheng, Z., Liang, H., Jiang, H., & Wang, J. (2020). Research on Visual Fatigue Related to Parallax. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, *180*, 513–521. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3867-4_60

- Sutherland, J., Belec, J., Sheikh, A., Chepelev, L., Althobaity, W., Chow, B. J. W., Mitsouras, D., Christensen, A., Rybicki, F. J., & La Russa, D. J. (2019). Applying Modern Virtual and Augmented Reality Technologies to Medical Images and Models. In *Journal of Digital Imaging* (Vol. 32, Issue 1, pp. 38–53). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0122-7>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, *12*(2), 257–285. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, *4*(4), 295–312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- Sweller, J., Ayres, P., Kalyuga, S., Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). Measuring Cognitive Load. In *Cognitive Load Theory* (pp. 71–85). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4_6
- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, *10*(3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>
- Syiem, B. V., Kelly, R. M., Goncalves, J., Velloso, E., & Dingler, T. (2021). Impact of Task on Attentional Tunneling in Handheld Augmented Reality. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 15. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445580>
- Tait, E. F. (1933). A Reciprocal Reflex System in the Accommodation-Convergence Relationships. *The American Journal of Psychology*, *45*(4), 647. <https://doi.org/10.2307/1416193>
- Tang, A., Owen, C., Biocca, F., & Mou, W. (2003). Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '03*, 73. <https://doi.org/10.1145/642611.642626>
- Tao, D., Tan, H., Wang, H., Zhang, X., Qu, X., & Zhang, T. (2019). A systematic review of physiological measures of mental workload. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 16, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152716>
- Tatić, D., & Tešić, B. (2017). The application of augmented reality technologies for the improvement of occupational safety in an industrial environment. *Computers in Industry*, *85*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.11.004>
- Theeuwes, J., Atchley, P., & Kramer, A. F. (1998). Attentional Control Within 3-D Space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(5), 1476–1485. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.5.1476>
- Theeuwes, J., & Pratt, J. (2003). Inhibition of return spreads across 3-D space.

- Psychonomic Bulletin and Review*, 10(3), 616–620.
<https://doi.org/10.3758/BF03196523>
- Thomas, L. C., & Wickens, C. D. (2001). Visual displays and cognitive tunneling: Frames of reference effects on spatial judgments and change detection. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 336–340.
<https://doi.org/10.1177/154193120104500415>
- Tole, J. R., Stephens, A. T., Harris, R. L., & Ephrath, A. R. (1982). Visual scanning behavior and mental workload in aircraft pilots. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 53(1), 54–61.
- Treisman, A., Kahneman, D., & Burkell, J. (1983). Perceptual objects and the cost of filtering. *Perception & Psychophysics*, 33(6), 527–532.
<https://doi.org/10.3758/BF03202934>
- Treisman, A. M. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, 76(3), 282–299. <https://doi.org/10.1037/h0027242>
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. In *Human Perception: Institutional Performance and Reform in Australia* (Vol. 12, pp. 3–42). <https://doi.org/10.4324/9781351156288-9>
- Treisman, Anne. (1982). Perceptual grouping and attention in visual search for features and for objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(2), 194–214. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.8.2.194>
- Tucker, J., & Charman, W. N. (1979). Reaction and response times for accommodation. *Optometry and Vision Science*, 56(8), 490–503.
<https://doi.org/10.1097/00006324-197908000-00003>
- Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1–20. <https://doi.org/10.20870/ijvr.2010.9.2.2767>
- van Zomeren, A., & Brouwer, W. (1994). *Clinical neuropsychology of attention* (Oxford Uni). [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(94)90083-3)
- Vedamurthy, I., Knill, D. C., Huang, S. J., Yung, A., Ding, J., Kwon, O. S., Bavelier, D., & Levi, D. M. (2016). Recovering stereo vision by squashing virtual bugs in a virtual reality environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1697). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0264>
- Vignal-Clermont, C., & Milea, D. (2016). Anatomie et anatomie fonctionnelle des voies visuelles. In *Neuro-Ophthalmologie* (pp. 59–72). Elsevier Masson.
<https://doi.org/10.1016/B978-2-294-73898-2.00005-6>
- Vovk, A., Wild, F., Guest, W., & Kuula, T. (2018). Simulator Sickness in Augmented Reality Training Using the Microsoft HoloLens. *The 2018 CHI Conference*, 1–9.
<https://doi.org/10.1145/3173574.3173783>

- Wagner-Greene, V. R., Wotring, A. J., Castor, T., Kruger, J., Dake, J. A., & Mortemore, S. (2017). Pokémon GO: Healthy or harmful? In *American Journal of Public Health* (Vol. 107, Issue 1, pp. 35–36). American Public Health Association Inc. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2016.303548>
- Wang, A., Liu, X., Chen, Q., & Zhang, M. (2016). Effect of different directions of attentional shift on inhibition of return in three-dimensional space. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *78*(3), 838–847. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1055-6>
- Wang, B., & Ciuffreda, K. J. (2006). Depth-of-focus of the human eye: Theory and clinical implications. *Survey of Ophthalmology*. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2005.11.003>
- Wang, X., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2016). A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Advances in Manufacturing*, *4*(1). <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>
- Wann, J., & Mon-Williams, M. (2002). Measurement of Visual Aftereffects Following Virtual Environment Exposure. In *Handbook of Virtual Environments*.
- Wann, J. P., Rushton, S., & Mon-Williams, M. (1995). Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, *35*(19), 2731–2736. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00018-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00018-U)
- Wanyan, X., Zhuang, D., & Zhang, H. (2014). Improving pilot mental workload evaluation with combined measures. *Bio-Medical Materials and Engineering*, *24*(6), 2283–2290. <https://doi.org/10.3233/BME-141041>
- Webel, S., Bockholt, U., Engelke, T., Gavish, N., Olbrich, M., & Preusche, C. (2013). An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. *Robotics and Autonomous Systems*, *61*(4), 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.013>
- Weintraub, D., & Ensing, M. (1992). *Human factors issues in head-up display design: the book of HUD (CSERIAC State-of-the-art Report)*.
- Werrlich, S., Eichstetter, E., Nitsche, K., & Notni, G. (2017). An Overview of Evaluations Using Augmented Reality for Assembly Training Tasks. *International Journal of Computer and Information Engineering*, *11*(10), 1129–1135.
- Westerfield, G., Mitrovic, A., & Billinghamurst, M. (2015). Intelligent augmented reality training for motherboard assembly. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, *25*(1), 157–172. <https://doi.org/10.1007/s40593-014-0032-x>
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Gordon, S. E., & Liu, Y. (1998). *An Introduction to Human Factors Engineering*.
- Wickens, C.D. (1991). Processing resources in attention. In *Multiple-task performance* (1st Editio).

- Wickens, Christopher D., & Alexander, A. L. (2009). Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays. *The International Journal of Aviation Psychology, 19*(2), 182–199. <https://doi.org/10.1080/10508410902766549>
- Wickens, Christopher D. (2005). Attentional tunneling and task management. *Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation Psychology, December*, 1–11.
- Wickens, Christopher D., & Long, J. (1994). Conformal Symbology, Attention Shifts, and the Head-up Display. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 38*(1).
- Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., & Luczak, H. (2003). Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation. *International Journal of Human-Computer Interaction, 16*(3), 497–514. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1603_7
- Wierwille, W. W., & Casali, J. G. (1983). Validated Rating Scale for Global Mental Workload Measurement Applications. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 1*(2), 129–133. <https://doi.org/10.1177/154193128302700203>
- Wille, M., Grauel, B., & Adolph, L. (2013). Strain caused by Head Mounted Displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2013 Annual Conference, 4959*(2013).
- Wolffsohn, J. S., McBrien, N. A., Edgar, G. K., & Stout, T. (1998). The influence of cognition and age on accommodation, detection rate and response times when using a car head-up display (HUD). *Ophthalmic and Physiological Optics, 18*(3), 243–253. <https://doi.org/10.1046/j.1475-1313.1998.00350.x>
- Wong, K., Yee, H. M., Xavier, B. A., & Grillone, G. A. (2018). Applications of Augmented Reality in Otolaryngology: A Systematic Review. In *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)* (Vol. 159, Issue 6, pp. 956–967). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/0194599818796476>
- Yang, Z., Shi, J., Jiang, W., Sui, Y., Wu, Y., Ma, S., Kang, C., & Li, H. (2019). Influences of augmented reality assistance on performance and cognitive loads in different stages of assembly task. *Frontiers in Psychology, 10*(JULY), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01703>
- Yeh, M., Wickens, C. D., & Seagull, F. J. (1998). Conformality and target cueing: Presentation of symbology in augmented reality. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 2*(21), 1526–1530. <https://doi.org/10.1177/154193129804202113>
- Yeh, M., Wickens, C. D., & Seagull, F. J. (1999). Target cuing in visual search: The effects of conformality and display location on the allocation of visual attention. *Human Factors, 41*(4), 524–542. <https://doi.org/10.1518/001872099779656752>

- Yeh, Y.-Y., & Wickens, C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human Factors*, *30*(1), 111–120.
<https://doi.org/10.1177/001872088803000110>
- Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2018). Studying eye movements as a basis for measuring cognitive load. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2018-April*. <https://doi.org/10.1145/3170427.3188628>
- Zhong, X., Liu, P., Georganas, N. D., & Boulanger, P. (2003). Entwurf einer kollaborativen Augmented-Reality-Anwendung für industrielles Training (Designing a Vision-based Collaborative Augmented Reality Application for Industrial Training). *It - Information Technology*, *45*(1).
<https://doi.org/10.1524/itit.45.1.7.19032>
- Žiak, P., Holm, A., Halička, J., Mojžiš, P., & Piñero, D. P. (2017). Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: Preliminary results. *BMC Ophthalmology*, *17*(1), 105.
<https://doi.org/10.1186/s12886-017-0501-8>

ANNEXES

IRON-MEN, l'opérateur augmenté au cœur de l'usine de demain

elm. leblanc et ses partenaires Immersion Technologies, Institut Mines Télécom et Adecam Industries présentent le projet IRON-MEN, **sélectionné par BPI France dans le cadre de l'Appel à Projets Grands Défis du Numérique, catégorie Réalité Augmentée.**



Crédit photo : elm. leblanc

Ce consortium va développer pendant 3 ans une solution de Réalité Augmentée pour les opérateurs de production. « *IRON-MEN renforcera les capacités de l'humain au centre des processus en développant sa polyvalence, en favorisant la montée en compétence des opérateurs et en revalorisant les métiers de l'industrie.* », indique Philippe LAFORGE, Directeur Général d'elm. leblanc.

elm. leblanc, marque historique sur le marché français du confort thermique, conçoit et fabrique en France des solutions innovantes de chauffage et de production d'eau chaude utilisant le gaz et les énergies renouvelables. elm. leblanc souhaite introduire ce type de solutions matérielles et logicielles dans son organisation industrielle.

À ce titre, la société a établi un partenariat scientifique et technique avec l'Institut Mines Télécom. Elle apportera son savoir-faire métier dans le domaine de l'Industrie du Futur et pourra compter sur les capacités de recherche de l'Institut pour l'accompagner.

La société Immersion, spécialiste des expériences de Réalité Augmentée développera l'interface logicielle interactive utilisée par les opérateurs. L'adaptabilité de la solution IRON-MEN en environnement industriel sera expérimentée dans les sites de production d'elm. leblanc (Drancy et Saint-Thégonnec) ainsi que via le partenariat avec Adecam Industrie.

De nombreux sites de production disposent de processus manuels ; l'être humain apportant une intelligence et une flexibilité faisant pour le moment défaut aux robots industriels. Ces qualités restent essentielles pour le tissu industriel français afin de pouvoir satisfaire une demande client toujours plus spécifique, exigeante et imprévisible.

« *La Réalité Augmentée transformera davantage notre quotidien que le smartphone, en façonnant à chaque instant le monde qui nous entoure en fonction de nos envies et de nos besoins.* », souligne Emmanuel BRICARD, Directeur des Systèmes d'Information d'elm. leblanc.





Crédit photo : elm. leblanc

La technologie mobile de Réalité Augmentée (RA) peut aider l'entreprise industrielle à développer à la fois sa flexibilité, son efficacité et sa qualité tout en renforçant la communication et le travail collaboratif. Pour toutes ces raisons son intégration dans les processus de fabrication pourrait agir comme un levier de compétitivité. Sa capacité d'adaptation et d'interaction avec l'homme et son environnement lui offre une flexibilité qui permettra d'assister l'opérateur dans ses tâches, sans nuire à sa sécurité.

Le projet IRON-MEN, soutenu par la DGE dans le cadre des Grands Défis du Numérique, vise à mettre l'opérateur augmenté au cœur de l'usine de demain via la conception d'un outil métier mobile de RA.

Cette solution accompagnera son utilisateur en le guidant dans ses missions quotidiennes permettant ainsi de développer sa polyvalence et de satisfaire une demande client de plus en plus personnalisée.

Le succès d'une technologie aussi intrusive qu'un casque de RA est conditionné par les capacités d'acceptation physiologique et psychologique de son utilisateur. Cette problématique est inscrite au cœur même du projet IRON-MEN et permettra d'en guider les développements technologiques.

L'ambition de la solution est de proposer une réponse industrielle et métier de RA correspondant à des besoins précis pour assister efficacement les utilisateurs dans leurs opérations manuelles, selon une approche originale alliant outils de la transformation numérique et respect de l'individu au sein de l'unité de production. Elle devra être adaptable rapidement à différentes problématiques métiers qui valident des besoins similaires.

www.elmleblanc.fr

VISUELS DISPONIBLES SUR SIMPLE DEMANDE AUPRÈS DU SERVICE DE PRESSE :

CABINET VERLEY - Contacts : Djaméla Bouabdallah - Emilie Saint-Pierre
Tél. : 01 47 60 22 62 - djamela@cabinet-verley.com - emilie@cabinet-verley.com

Annexe 2 : Virtual Reality Symptoms Questionnaire

Questionnaire 1

Participant :

Date :

Symptômes généraux

	Aucun	Léger		Modéré		Sévère	
Inconfort général	0	1	2	3	4	5	6
Fatigue	0	1	2	3	4	5	6
Ennui	0	1	2	3	4	5	6
Somnolence	0	1	2	3	4	5	6
Maux de tête	0	1	2	3	4	5	6
Vertiges	0	1	2	3	4	5	6
Difficulté de concentration	0	1	2	3	4	5	6
Nausée	0	1	2	3	4	5	6

Symptômes oculaires

	Aucun	Léger		Modéré		Sévère	
Yeux irrités	0	1	2	3	4	5	6
Fatigue visuelle	0	1	2	3	4	5	6
Vision floue	0	1	2	3	4	5	6
Difficulté à voir net	0	1	2	3	4	5	6

Autres symptômes :

.....

.....

.....

Annexe 3 : Exemple de matrices des 12 catégories d'objets

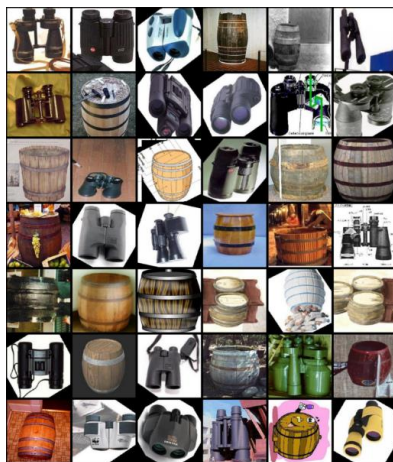
Ballon - Chaise



Accordéon - Photo



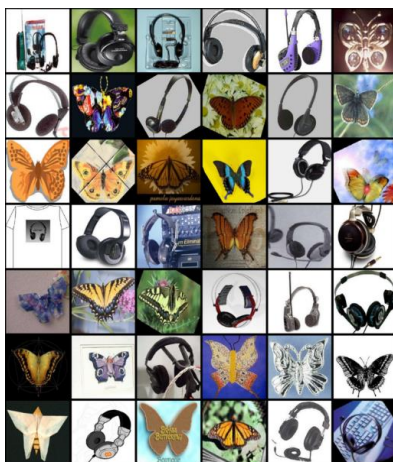
Jumelle - Tonneau



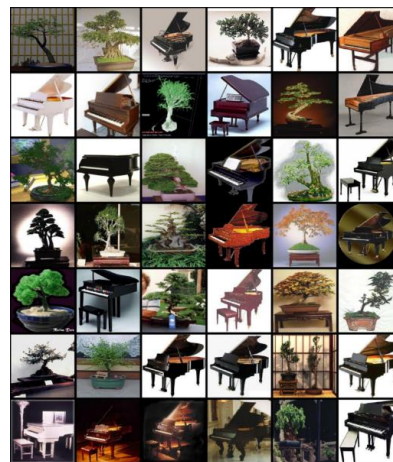
Etoile de mer - Tasse



Papillon - Casque audio



Piano - Bonzaï



Annexe 4 : Questionnaire NASA TLX

Date de passation :

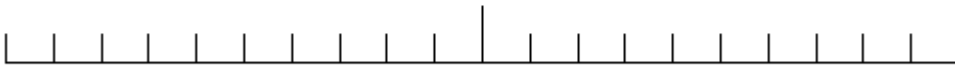
Participant N° :

Bloc :

Ce questionnaire a pour but d'évaluer, sur plusieurs dimensions, le coût cognitif de la tâche que vous venez d'effectuer. Lisez chaque item et la définition associée et entourez/barrez la graduation correspondant à votre état actuel.

Exigence mentale

Dans quelle mesure des opérations mentales et perceptives sont-elles été requises (par exemple, penser, décider, calculer, se rappeler, regarder, chercher, etc.) ? Ont-elles conduit à une tâche plutôt facile ou difficile, simple ou complexe, abordable ou exigeante ?



Faible

Elevée

Exigence physique

Dans quelle mesure des opérations physiques ont été requises (par exemple, pousser, tirer, tourner, contrôler, activer, etc.) ? Ont-elles conduit à une tâche plutôt facile ou difficile, lente ou rapide, détendue ou intense, reposante ou pénible ?



Faible

Elevée

Exigence temporelle

A combien estimez-vous la pression temporelle que vous avez ressentie, que ce soit à cause du rythme ou de la cadence de la tâche en elle-même ou des éléments de la tâche ? La cadence était-elle lente ou tranquille ou rapide et frénétique ?



Faible

Elevée

Performance

Dans quelle mesure vous pensez avoir réussi à accomplir les objectifs de la tâche fixés par l'expérimentateur ou vous-même ? Dans quelles mesures êtes-vous satisfait de votre performance en ayant accompli ces buts ?



Faible

Elevée

Effort

Quelle a été l'effort à fournir (mentalement et physiquement) sur la tâche pour obtenir votre niveau de performance ?



Faible

Elevée

Frustration

Au cours de la tâche, vous avez ressenti davantage d'insécurité, de découragement, d'irritation et de stress ou davantage de sécurité, gratification, satisfaction et décontraction ?



Faible

Elevée

Autres commentaires :

Annexe 5 : Questionnaire de fin d'étude (Etude 3 et 4)

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 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 (*FPS, RPG, Simulation, Sport*) ?
- Vous pratiquez les jeux vidéo depuis combien de temps (*mois, années*) ?
- Quelle est la fréquence de vos sessions de jeux par semaine (*nombre*) ?
- Quelle est la durée de chaque session en heures (*nombre*) ?

Rapport à la RV :

- Etes-vous être familier des casques de réalité virtuelle : Oculus Rift, HTC Vive, 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 à la RA :

- Etes-vous être familier des casques de réalité augmentée : 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*) ?

Annexe 6 : Instructions d'assemblage utilisées pour l'étude 5

Poste 101.1

1. Retirer les 4 bouchons de protection sur le côté gauche et les jeter dans la poubelle
2. Prendre la CTN dans le bac
3. Mettre sur la CTN de la pâte thermo-conductrice
4. Prendre la patte de maintien
5. Positionner la patte en la clipsant sur la CTN
6. Positionner l'ensemble sur le ballon
7. Prendre une rondelle
8. Positionner la rondelle
9. Prendre un écrou
10. Placer l'écrou
11. Visser l'écrou à l'aide de la visseuse verte
12. Faire tourner le ballon de 180° (demi-tour)
13. Prendre 2 pattes de vase d'expansion
14. Positionner la première : l'embout vers la droite et faire correspondre les trous
15. Positionner la deuxième de la même manière
16. Prendre 2 vis tôle
17. Visser les vis à l'aide de la visseuse grise : visser au milieu des deux cadres, dans le trou central
18. Faire tourner le ballon 1/4 vers soi
19. Prendre 2 vis tôle
20. Visser les vis à l'aide de la visseuse grise : visser au milieu des deux cadres, dans le trou central
21. Faire tourner 2/4 vers soi
22. Prendre 2 vis tôle
23. Visser les vis à l'aide de la visseuse grise
24. Faire tourner le ballon 1/4 vers soi
25. Prendre une patte inférieure
26. Positionner la patte sur le cadre de droite : bien la positionner avec les 2 trous en face
27. Prendre 2 Vis
28. Visser les 2 vis à l'aide de la visseuse à main blanche
29. Prendre 2 équerres
30. Positionner la première en haut du cadre de gauche
31. Positionner la deuxième en bas du cadre de gauche
32. Prendre 2 Vis

33. Visser les 2 vis à l'aide de la visseuse à main blanche

Poste 101.2

1. Prendre 8 rivets inox
2. Positionner les 8 rivets au niveau des 4 structures
3. Prendre 2 montants de structure
4. Positionner le premier montant
5. Positionner le deuxième montant
6. Prendre 1 traverse de structure
7. Positionner la traverse
8. Prendre 1 traverse de structure
9. Positionner la traverse
10. Verrouiller les 4 sauterelles
11. Lancer le cycle de rivetage en appuyant sur le bouton
12. Vérifier que le voyant est vert (si le voyant vert est éteint, vérifier la structure.
Puis lancer un nouveau cycle).
13. Déverrouiller les 4 sauterelles

Questionnaire Etude elm.leblanc

Numéro de participant :

Données socio-démographiques :

Homme Femme

Quel est votre âge ? :

.....

Quelle est votre profession au sein d'elm.leblanc ?

.....

Quel est votre niveau d'étude ?

.....

Santé visuelle :

Portez-vous des lunettes ou lentilles de correction de vue correctrices ?

.....

Quel type de défaut visuel est corrigé ?

.....

Si vous connaissez les valeurs de vos corrections, merci de les indiquer :

.....

Connaissances et pratique des technologies :

Avez-vous une pratique soutenue des jeux vidéo (si oui, quel support, fréquence, durée) ?

.....

.....

Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle (si oui pendant combien d'heures cumulées) ?

.....

.....

Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité augmentée (si oui pendant combien d'heures cumulées) ?

.....

.....

Assemblage manuel :

Avez-vous une expérience d'assemblage manuel (si oui, combien de temps : mois, années) ?

.....
.....

Quel type de support avez-vous préféré pour réaliser l'assemblage ?

- Réalité augmentée Ordinateur

Pour quelles raisons ?

.....
.....
.....
.....

Avez-vous des commentaires, suggestions ?

.....
.....
.....
.....
.....

Annexe 8 : Recommandations à la médecine du travail d'elm.leblanc pour l'intégration et l'usage de la RA en milieu industriel

- Informer les utilisateurs des risques connus ou potentiellement associés à l'utilisation de la RA. Informer les utilisateurs qu'ils peuvent et doivent arrêter toute exposition en cas d'apparition de symptômes et qu'ils doivent déclarer tous effets indésirables à la médecine du travail.
- Réaliser des sessions de formation ou fournir des guides pour les futurs utilisateurs, avec des explications concrètes sur les bons gestes à adopter lors de l'utilisation, e.g., port du casque, réglage de la visière, clignement régulièrement des yeux afin d'éviter une sécheresse oculaire.
- Définir, en fonction des besoins un planning des sessions d'utilisation, comprenant obligatoirement des temps de repos « 20/20/20 ». Ces pauses doivent être réalisées dans un lieu adapté, toutes les 20 minutes, pendant 20 secondes, en regardant un objet fixe à une distance de 20 mètres (au plus loin possible). Nous recommandons de ne pas excéder 30 min consécutives d'utilisation de la RA.
- Assurer un suivi des utilisateurs exposés à la RA. Ceci peut prendre la forme d'une surveillance par une personne formée aux risques associés pendant que l'utilisateur porte le casque, mais également celle d'un bilan réalisé par la médecine du travail à intervalle régulier.
- Proposer une adaptation du poste de travail si nécessaire ou une alternative à la RA pour les personnes sensibles identifiées.

Titre : Effets de la réalité augmentée sur la vision binoculaire, l'attention visuelle et la charge mentale

Mots clés : Réalité augmentée, fatigue visuelle, attention visuelle, orientation visuo-spatiale, charge mentale

Résumé : La réalité augmentée (RA) s'intègre de plus en plus au sein du milieu professionnel, notamment dans le domaine de la formation industrielle. Afin d'assurer la sécurité et la santé des opérateurs, il est central d'évaluer les risques sanitaires potentiellement liés à une utilisation régulière et prolongée de la RA. Le but de cette thèse est d'évaluer les potentiels effets physiologiques et cognitifs de la RA. Nous avons réalisé deux études évaluant les effets de la RA sur la vision binoculaire. Ces études montrent que l'utilisation de la RA ne présente pas de risque de fatigue visuelle ou d'inconfort visuel, pour des utilisateurs présentant ou non des troubles de la vision binoculaire préexistants. Nous avons également réalisé deux études sur l'attention visuelle en RA. Ces dernières suggèrent que les mécanismes attentionnels sont influencés par le traitement simultané d'informations virtuelles et réelles. Ainsi, lors de l'utilisation de la RA, le fait de passer entre des informations virtuelles et réelles

peut dégrader les performances visuelles et la capacité à détecter des événements extérieurs inattendus peut être altérée.

Enfin nous avons également évalué l'intégration effective de la RA directement en milieu industriel, afin d'évaluer les effets de la présentation d'instructions en RA sur l'efficacité des performances d'assemblage et sur la charge mentale. L'utilisation de la RA ne présenterait pas nécessairement de bénéfice en termes d'efficacité sur les performances (temps et erreurs d'assemblage) et peut engendrer une augmentation de la charge mentale lorsque le poste d'assemblage est simple, mais engendrerait une charge équivalente à celle d'un ordinateur quand le poste est complexe.

Dans le cadre d'une utilisation industrielle, la RA devrait donc être utilisée avec une certaine précaution. Toute intégration de la RA devrait donc être associée à un protocole d'évaluation afin de quantifier les potentiels impacts sur les performances et de s'assurer que la solution RA proposée apporte plus de bénéfices que la solution déjà existante.

Title: Effect of augmented reality on binocular vision, visual attention and mental workload

Keywords: Augmented reality, visual fatigue, visual attention, visual orienting of attention, mental workload

Abstract: Augmented reality (AR) is increasingly used into professional environments, especially for industrial training. In order to ensure operator's safety and health, it is central to assess the potential risks associated with regular and prolonged use of AR. The aim of this thesis is to evaluate potential physiological and cognitive effects of AR.

We conducted two studies in order to evaluate the effects of AR on binocular vision. These studies show that the use of AR does not present a risk of visual fatigue or discomfort for users with or without pre-existing binocular vision disorders.

We have also conducted two studies on visual attention in AR, which suggest that attentional mechanisms are influenced by the simultaneous processing of virtual and real information. Thus, when using AR, switching between virtual and real information may degrade visual performance and the ability to detect unexpected external events may be impaired.

Finally, we also evaluated the effective integration of AR directly in an industrial setting, in order to assess the effects of presenting instructions in AR on the efficiency of assembly processes and on mental workload. The use of AR would not necessarily have any efficiency benefits on performance (assembly time and errors) and may lead to an increase in mental load when the assembly station is simple, but would lead to a load equivalent to that of a computer when the station is complex.

Therefore, in industrial settings AR should be used with caution, and any integration of AR should therefore be associated with a protocol to quantify the potential impacts on performance and to ensure that the proposed AR solution provides more benefits than the existing solution.