

La réalité virtuelle : Quelles limites pour la perception spatiale en visiocasque

ACTIVITES ET INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION 3

- F. Guéna
- A. Tuscher
- J. Silvestre

Etudiant

Riyadh Mahdi



Date : 27/02/2021

SOMMAIRE

- Avant-propos
- Introduction

1. FONDEMENTS THEORIQUES DE LA REALITE VIRTUELLE	6
A.1. Des définitions aux contours flous	7
A.2. Vocabulaire et définitions	7
A.3. Définition retenue	8
B. Caractéristiques de la réalité virtuelle	9
B.1. IMMERSION.....	9
B.2. INTERACTION.....	9
C. Rappel succinct de l'histoire de la réalité virtuelle.....	11
D. Etat de l'art	15
D.1. Une perception très précise de la distance égocentrique dans le monde réel	15
D.2. Une sous-évaluation de la distance égocentrique dans le monde virtuel pas encore comprise.....	16
D.3. Une méconnaissance de la sous-évaluation de la distance égocentrique dans les applications architecturales de la réalité virtuelle	18
E. Applications de la réalité virtuelle	20
F. Interfaces visuelles portables : Le visio-casque	22
F.1. L'architecture d'un visio-casque	22
F.2. Qualité visuelle des visio-casques	24
G. La vision Stéréoscopique	25
G.1. La vision humaine : accommodation et (con)vergence	26
G.1.1. L'accommodation.....	26
G.1.2. La vergence	27
G.1.3. Incohérences oculomotrices liées au visio-casque.....	28
H. Les environnements virtuels 3D	29
H.1. Terminologie et définition	29
H.2. Caractéristiques des environnement virtuels	29

2. APPROCHE PRATIQUE : EXPERIMENTATION DE LA PERCEPTION SPATIALE EN VISIOCASQUE.....30

A. INTRODUCTION	31
A.1. Construction de l'environnement spatial.....	31
A.2. Objectifs	31
A.3. Méthode de génération des images en RV et choix des logiciels :.....	32
A.3.1. Les outils de capture d'information :.....	32
A.3.2. L'outil de modélisation :.....	33
A.3.3. L'outil de rendu	34
A.3.4. L'outil de visualisation :	34
A.4. Sélection du visiocasque :.....	35
B. Expérience 1	36
B.1. Résultats	38
C. Expérience 2	40
C.1. Résultats	43

3. Discussion et conclusion.....45

- **Bibliographies**
- **Annexes**

INTRODUCTION

La réalité virtuelle représente un média révolutionnairement fondamental pour interagir avec les systèmes ordinateurs. C'est aussi un nouveau moyen d'expression qui continue encore aujourd'hui, bien plus rapidement qu'avant, d'évoluer sans cesse. Ce domaine porte en lui les promesses d'une capacité d'immersion dans des mondes artificiels numériques. Ces derniers ont vu le jour en premier dans les œuvres de William Gibson en 1984 comme « cyberspace » dans son livre intitulé « Neuromancer ». Plusieurs décennies après, la réalité virtuelle permet à ses utilisateurs d'entrer dans une unification sensorielle et perceptive dans un environnement virtuel. Pourtant, à ses débuts, cette dernière a pu décevoir au point de susciter des interrogations sur sa pertinence. Elle fut contrainte par les limites du développement technologique de la deuxième moitié du XXe siècle et n'a pas pu susciter l'engouement tant attendu du public.

Aujourd'hui, les applications de cette technologie foisonnent. Des secteurs très variés investissent dans celle-ci comme la médecine en ayant recourt à elle comme moyen de formation des futurs chirurgiens ou en thérapie des malades. C'est aussi dans la formation professionnelle dans différents domaines comme l'industrie ou la sécurité civile qu'elle a su se prouver très efficace avec des résultats prometteurs. L'ensemble de ces résultats est en grande partie dû à une démocratisation de cette technologie et ceux dès le début des années 2010 avec l'arrivée des « big tech » dans ce domaine. Ceci a rapidement fait parvenir des modèles de visiocasques à réalité virtuelle au grand public à des prix qui restent accessibles aux particuliers comme aux petites et moyennes entreprises. Fini alors le temps où la réalité virtuelle était l'apanage des grandes entreprises d'aviation et d'aérospatiale et où elle restait cloisonnée dans ses hangars et laboratoires.

Le secteur de l'architecture n'en demeure pas moins intéressé par le potentiel de la réalité virtuelle. L'impact économique par le développement de moyens techniques de présentation de bâtiments virtuels reste à court et à moyen terme très intéressant. Il en va sans dire qu'une représentation virtuelle d'un espace architectural à échelle 1 :1 permet de mieux en apprécier les qualités et d'en dresser une analyse plus appropriée.

Pourtant, si plusieurs publications existent sur la réalité virtuelle depuis les années 1990. Celles qui traitent des limites visuelles d'un visio-casque dans un espace architectural demeurent très rares. Souvent il est question d'analyser la réalité virtuelle, ses interfaces d'interaction ou ses effets psychologiques sur l'être humain dans des situations idéales. Les utilisateurs sont souvent amenés à tester la RV dans des interfaces plus élaborées (et plus chères) que le visio-casque comme la CAVE où sont testées des hypothèses dans une démarche de recherche scientifique absolue de la réalité virtuelle.

Ces démarches oublient souvent de prendre en compte que l'usage majoritaire de la réalité virtuelle et la source de sa démocratisation demeure dans les visio-casques même si ceux-là ont des caractéristiques plus faibles que d'autres plus utilisés dans les laboratoires.

Compte tenu de la présence continue du visio-casque dans les applications diverses liées à l'architecture de la formation professionnelle à la conception en passant par la vente immobilière. Il nous paraît intéressant de nous interroger sur la fidélité que peut avoir l'expérience spatiale rendue d'un espace virtuel et de son équivalent réel pour un utilisateur de visio casque. À cela nous nous posons la question de :

Quelles sont les limites de la perception spatiale en visio-casque ?

Afin d'investiguer cette problématique nous convenons de développer le plan de travail suivant qui se déroule en deux chapitres complémentaires.

Le premier chapitre comporte une sélection des fondements théoriques de la réalité virtuelle nécessaires pour éclairer notre démarche de recherche expérimentale. On y trouve en premier lieux les différentes définitions de la réalité virtuelle et celle qui sera retenue pour notre travail. Ensuite nous aborderons les deux caractéristiques principales de la RV ; à savoir l'immersion et l'interaction. Il en suivra une bref historiques des principaux jalons et avancés technologiques qui ont fait l'avènement de la réalité virtuelle dans son expérience actuelle.

Dans la partie suivante nous donneront un court aperçu des applications de la RV dans le domaine de l'architecture en citant différents exemples du monde du bâtiment et des travaux publics.

Dans un autre temps, il nous paraît essentiel d'apporter un éclairage sur l'aspect matériel dans le domaine de la réalité virtuelle notamment en parlant des interfaces visuelles portables. Nous expliquerons alors sous forme de sous parties l'architecture des visiocasques et aborderons la notion clés de leur qualité visuelle pour l'utilisateur de la RV.

Nous poursuivons ensuite plus profondément en expliquant les notions de stéréoscopie. Ce sera alors l'occasion de décrire ses principes techniques ainsi que les paramètres qui rentrent en jeu pour la création d'image stéréoscopique.

Enfin, on termine le premier chapitre des fondements théorique par la définition des environnements virtuelle et par une brève explication de leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre concerne l'approche pratique de l'expérimentation sur la perception spatiale en visio-casque. Il comprend alors deux essaie différents ; le premier se passe dans une salle de réunion et le deuxième dans un séjour. Il en suivra un exposé des résultats et une discussion qui aboutira par une conclusion et des formulations d'hypothèses autours de cette dernière.

Concernant la méthodologie suivie pour élaborer ce mémoire nous avons préconisé les ressources informatiques plus accessibles à trouver que les ressources papiers. En effet, le contexte sanitaire actuel et la fermeture des bibliothèques nous a obligé à nous concentrer sur l'information numérique. Il n'en demeure pas moins que notre bibliographie trouve appuie sur un grand nombre de publications de références du site Technique de l'Ingénieur ou de Research Gate et autres sources de publications dans le domaine. Une fois notre sujet et problématique définis nous avons procédé à un filtrage qui hiérarchise les notions les plus importantes à définir et à expliciter dans notre mémoire.

À cette étape, il nous paraissait clair que la structure de notre travail devait comporter un premier chapitre qui regroupe ces fondements théoriques et un deuxième dédié à la phase expérimentale et à ses résultats. L'objectif de notre travail reste aussi de garder une certaine lisibilité des parties abordées en veillant à ne pas trop entrer en profondeur dans certaines notions au risque de perdre le lecteur (certains détails sont tout de même joints dans les annexes). C'est donc plus un travail de synthèse qui a été recherché pour le premier chapitre afin d'outiller au mieux l'analyse et les hypothèses abordés dans le deuxième chapitre expérimental.

1. FONDEMENTS THEORIQUES DE LA REALITE VIRTUELLE

A.1. Des définitions aux contours flous

Alors que dans certains domaines scientifiques la définition scientifique du domaine abordée est claire et adoptée il convient de souligner que s'agissant de la réalité virtuelle sa simple définition demeure sujette à débat dans le milieu de la recherche scientifique.

Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette ambiguïté ; à commencer par l'expression même de « réalité virtuelle », l'interdisciplinarité des domaines d'application auxquelles on fait appel à elle et qui vont de l'ingénierie à la psychologie. Aussi, il peut s'agir d'un manque de recul ou de tassement des recherches scientifiques actuelles dans le domaine dus à l'ascension fulgurantes de la technologie de la réalité virtuelle ces dernières décennies.

A.2. Vocabulaire et définitions

En premier lieu, Il convient de comprendre d'abord la genèse de l'expression « réalité virtuelle » un oxymore qui peut bien nous laisser sceptique. À l'origine *virtual reality* fut employée en premier par Jaron Lanier [KHS89] en 1989 président de la société VPL Research durant le salon Texpo. L'expression utilisée comme argument marketing pour ses Dataglove et visiocasque Eyephones sera alors pour le moins réussie¹.

D'autres chercheurs comme Stephan Ellis [Ell91] vont substituer cette expression qui sera d'ailleurs mal traduite de l'anglais² par une autre plus cohérente à leurs yeux qu'est « l'environnement virtuel » sans qu'elle fasse l'unanimité des chercheurs du domaine.

Selon Bouvier [Bou09] et après moult débats, la communauté française tend à s'accorder autour d'une finalité et de deux définitions de la réalité virtuelle.

D'abord le professeur Fuchs [Fuc03] dont les travaux sont devenus aujourd'hui une référence en la matière précise la réalité virtuelle de la manière suivante :

« La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. »

Bouvier [Bou09] distingue alors une définition dite « fonctionnelle » de la réalité virtuelle de Fuchs [FM03] :

« La réalité virtuelle va permettre à l'homme de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et(ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique. »

Et une autre définition « technique » d'Arnaldi et al [AFT03] :

¹ Se référer aussi au livre d'Howard Rheingold [Rhe93] qui résume l'histoire de la réalité virtuelle et ses principaux acteurs à ses débuts.

² Selon Patrice Bouvier [Bou09] une mauvaise traduction du mot « virtual » qu'il aurait fallu comprendre selon J.P Papin [FM03] comme « quasiment ». L'expression de « réalité vicariante » aurait été alors plus adéquate.

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

A.3. Définition retenue

Alors que la finalité de réalité virtuelle citée précédemment reste à ce jour inchangée nous avons décidé de retenir la définition la plus récente et englobante que Fuchs [FMP14] apporte dans des éditions plus récentes [FM06] :

« Les techniques de la réalité virtuelle sont fondées sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion de l'utilisateur dans cet environnement ».

Alors que la littérature foisonne de définitions différentes Fuchs souligne que deux termes ressortent de toutes ces définitions : **immersion et interaction**.

Pour lui, la réalité virtuelle est une immersion efficace et partiellement naturelle de l'utilisateur dans un environnement virtuel. Cette dernière doit alors être analysée sous divers aspects dont l'aspect physiologique et psychologique car la finalité est bien de projeter un sujet physiquement et cognitivement dans un monde virtuel.

On parle alors de l'immersion et de l'interaction comme deux fonctions ou caractéristiques essentielles de la réalité virtuelle.

Autres définitions

Burdea et Coiffet [BC93] définissent la réalité virtuelle par le triptyque Immersion, Interaction et Imagination. Alors que les deux premiers I font l'unanimité dans la communauté et sont même considérés comme les conditions sine qua non pour accepter une application comme étant de la réalité virtuelle, le troisième I est lui sujet à discussion et sera fortement remis en cause par Fuchs.

Un autre triptyque sera introduit en 1992 par Zeltzer [Zel92] constitué de l'autonomie, de l'interaction et de la présence. Selon Bouvier [Bou09] l'autonomie désigne le comportement des entités virtuelles présentes dans l'environnement virtuel. L'interaction pointe la capacité d'interagir avec ces entités et l'environnement. La présence est ici associée à la stimulation sensorielle. Autonomie, interaction et présence sont vues comme les dimensions définissant l'espace des environnements virtuels.

B. Caractéristiques de la réalité virtuelle

B.1. IMMERSION

La réussite d'une expérience de réalité virtuelle ou VR ne demeure pas dans le fait que l'environnement virtuel soit aussi réel que le monde physique mais bien dans la possibilité que le monde virtuel créé soit « assez réel » à l'utilisateur pour interrompre sa non croyance en ce monde virtuel et l'amener au sentiment d'y être pour de vrai pendant une période de temps. On parle alors de la notion d'immersion qui revient à dire que l'on bloque nos distractions venues du monde physique pour pleinement et sélectivement se concentrer sur les informations que l'expérience de réalité virtuelle dispose autour de nous.

Afin de réussir une expérience immersive il faut alors que la représentation du monde virtuel dans lequel l'utilisateur est projetée soit de sa propre perspective.

Chiu-Shui Chan [Chiu97] compare l'effet d'immersion à celui d'une audience dans un théâtre. C'est seulement quand l'audience est en immersion que leur attention se concentre sur les performances des acteurs. Si le théâtre dispose d'une atmosphère immersive, alors à travers son décor, scénario et sa musique l'audience sera invitée dans le scénario des acteurs. Cette expérience immersive a le pouvoir alors de convaincre, de former et d'inspirer les autres.

Depuis plusieurs décennies déjà, la définition même de l'immersion a varié selon l'angle par laquelle on la définit. On peut dire qu'il existe deux courants :

Un premier qui est né avec les courants historiques de la psychologie cognitive. Il suggère que dans l'immersion il n'y a pas de distinction entre la partie immersion sensori-motrice et celle cognitive ou entre la perception et l'action. Cela se traduit par des approches comme l'enaction ou perception incarnée [TBM06].

Le deuxième courant qu'on peut trouver chez Slater (Immersion et Behavioral Fidelity) [Sla03] ou Fuchs désignent l'immersion comme le degré de complétude et la qualité des interfaces d'un environnement virtuel. Selon Slater cela permet de distinguer clairement entre la notion de présence et d'immersion notamment en limitant cette dernière sur ce que la technologie de réalité virtuelle propose d'un point de vue objectif. Ainsi, plus un système offre d'interfaces et de suivi des mouvements humains qui préservent la fidélité par rapport au monde réel le plus il est immersif. C'est cette dernière approche de l'immersion, que nous choisissons de prendre en compte pour notre travail de recherche.

B.2. INTERACTION

L'interaction est un aspect crucial de la réalité virtuelle et qui comporte deux dimensions : La navigation à l'intérieur du monde et les dynamiques de l'environnement virtuel. La navigation est la capacité de l'utilisateur à se déplacer dans EV en toute indépendance. C'est aussi relié au nombre de libertés que permet l'équipement de RV. Les dynamiques de l'environnement virtuel sont les options qui permettent à l'utilisateur d'effectuer des actions dans celui-ci. Cela peut

être par exemple la capacité de changer de point de vue d'une personne debout à une personne en fauteuil roulant pour simuler son déplacement dans un environnement virtuel.

Il est important à préciser que dans notre travail nous portons notre intérêt pour la caractéristique de l'immersion et moins pour l'interaction et ceux pour plusieurs raisons.

En premier lieu, avec le développement technologique l'interaction aujourd'hui ne se limite plus à la souris et au clavier mais avec des gants et des manettes connectés qui permette une variété d'interactions dans l'environnement virtuel. Ceci complique notre capacité d'analyse des résultats obtenus lors de notre phase de recherche expérimentale.

En deuxième lieu, notre intérêt porte beaucoup plus à l'analyse de la partie où l'utilisateur analyse de manière passive l'environnement virtuel auquel il est immergé. Ceci exclut donc toute nécessité d'action dans le monde virtuel.

Enfin, aujourd'hui la partie de l'interaction en RV nécessite un travail beaucoup plus approfondi non seulement sur le volet technique de la réalité virtuelle (technologiquement parlant) et sur la partie sensori-motrice et cognitive de celle-ci. L'intégrer à ce travail risque alors d'être superficiel et mener à une erreur d'analyse de notre part.

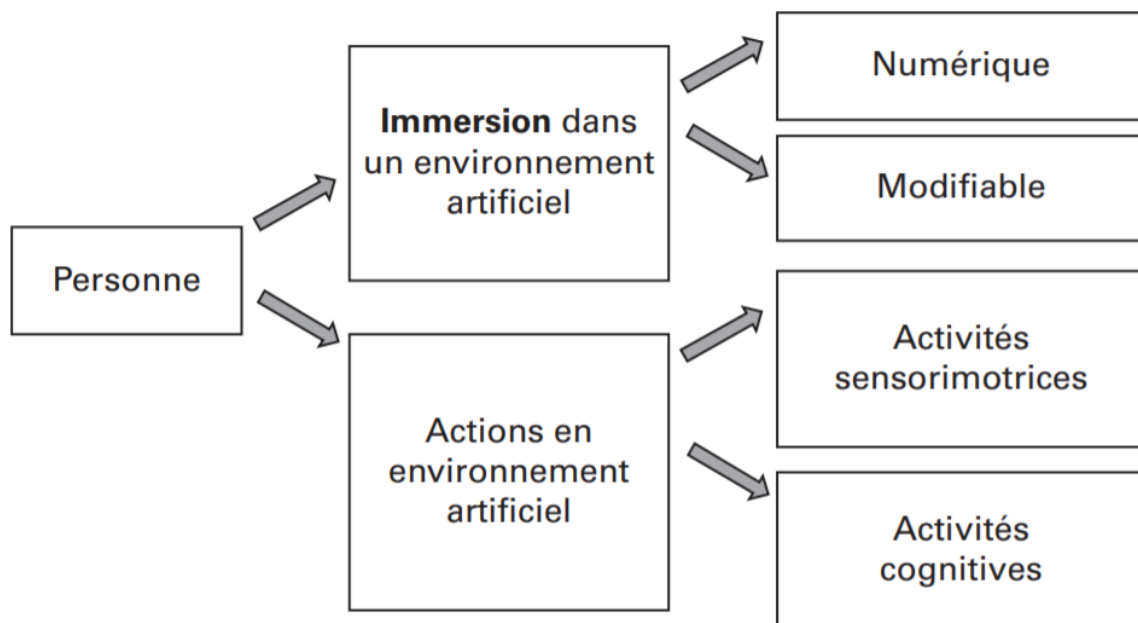


Figure 1 Les caractéristiques de la réalité virtuelle, [Fuc19]. Notre intérêt est uniquement pour la partie d'immersion dans la réalité virtuelle.

C. Rappel succinct de l'histoire de la réalité virtuelle

L'avènement de la réalité virtuelle est étroitement lié à l'essor de l'informatique notamment en ce qui concerne la synthèse d'images. Pour cela nous trouvons qu'il est intéressant d'en rappeler les principaux jalons ou évolutions majeurs qui ont permis l'arrivée du système de RV telle qu'on le connaît aujourd'hui.

1957-62 : HEADGEAR

L'un des aspects les plus importants dans la réalité virtuelle est sa capacité à donner aux utilisateurs l'impression d'être réellement dans le monde synthétique que de simplement percevoir une série d'images ou d'événements. Les toutes premières inventions à parvenir à cet effet sont les « stéréoscopes », les stéréogrammes holographiques et les films 3-D diffusés en grand écran pour projeter les spectateurs en immersion.

Le *Stereoscopic Television Apparatus for Individual Use (STAIU)* est la première expérimentation se rapproche le plus de ce qu'on peut connaître aujourd'hui comme système de RV. Elle fut développée par Morton Heilig en 1957 [Hei62] où il a conçu un appareil de vision pour le STAIU qui incluait un grand champ optique et des écrans d'affichage individuels pour chaque œil de l'observateur.

Heilig pousse son idée plus loin en concevant le Sensorama Simulator en 1961-62 pour incorporer « couleur, mouvement visuel, son 3D, brises, odeurs et sensations tactiles ».

Dans ce dispositif l'utilisateur est passif (spectateur) et participe par exemple en tant que cycliste à une tournée dans le quartier de Brookline à New-York.

Ce dispositif est tellement précurseur de la réalité virtuelle, qu'il est même précurseur du terme lui-même de réalité virtuelle



Figure 2 Photo du dispositif du "Sensorama »

Source : <http://www.telepresence.org>

1962 : CAO

La simulation des données est possible grâce à un logiciel graphique pour la première fois. Cela ouvre la porte au domaine CAO (conception assistée par ordinateur).

1965 : LA SOURIS

La possibilité de communiquer avec des ordinateurs est démocratisée avec l'invention de la souris. Celle-ci permet alors d'agir comme interface « comportementale » de communication entre l'homme et l'ordinateur par la retranscription des mouvements de la main.

1965 : HEAD-MOUNTED DISPLAY (HMD)

Un grand pas vers la RV telle qu'on la connaît aujourd'hui fut réalisé en 1965 par le travail d'Ivan Sutherland [Sut65] en dépassant les travaux de Heiling dont la RV était limitée à l'écran plat des interfaces moniteurs. Il s'agit du premier visiocasque informatique (Head Mounted Display ou HMD) et qui fut développé au MIT en 1965. Sutherland décrit son dispositif comme une ouverture ou une fenêtre sur l'environnement virtuel. Cet appareil en forme de casque a reçu le surnom de « l'épée de Damoclès » due au poids conséquent du hardware (pièces informatiques) qui nécessitent d'être attachées au plafond avec les différents câbles qui pendent au-dessus de la tête de l'utilisateur. Deux afficheurs vidéo ou tubes cathodiques monochromatiques (sans offrir pour autant une vision stéréoscopique vu que les images sont les mêmes pour chaque œil) sont à l'origine de ce poids sur la tête.



Figure 3 HMD appelé aussi "épée de Damoclès"

Sources : [Sut65]

1970 : VISIO-CASQUE

Daniel Vickers de l'université de Utah conçoit le premier visiocasque comme dispositif qui permet d'être en immersion dans le monde de réalité virtuelle avec la capacité pour l'utilisateur de tourner la tête sans soucis. Il est équipé de deux écrans de petite dimension. Un capteur au niveau de la tête permet de détecter l'orientation de la tête et de changer d'image en accord avec elle.

1982 : HELMET

En cette année, Thomas Furness développe le « super cockpit », un système de simulation de vol conçu dans le but d'aider à la formation des pilotes d'avions supersoniques. Ces pilotes ont porté ces casques surdimensionnés en étant assis dans des maquettes physiques de cockpits. Ces casques spécialement conçus pour cela permettaient au pilote de voir un environnement créé par ordinateur à l'intérieur de son casque. Les gants du pilote étaient alignés avec le positionnement des capteurs de sorte à activer des fonctionnalités que le pilote pointe avec ses doigts sur des boutons virtuels.

Plus tard ce même système sera repris par la NASA dans le domaine de la telepresence et servira dans une version plus évoluée aux astronautes dans la station spatiale pour diriger les robots en sortie extra spatiale.

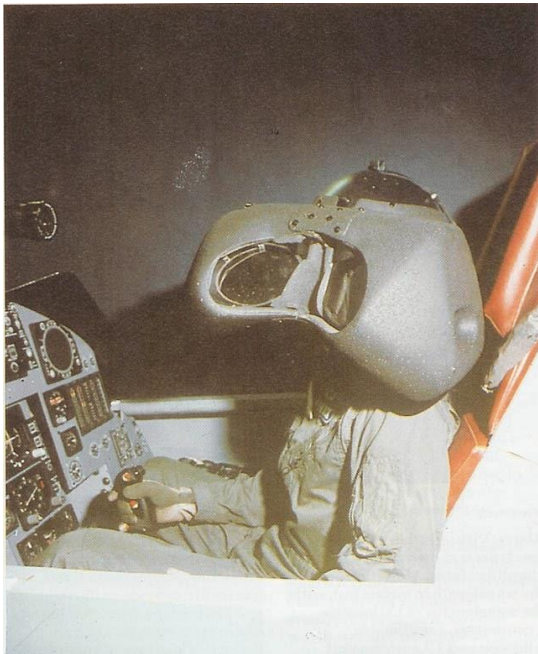


Figure 4 le "super cockpit" de T. Furness

Source : <https://voicesofvr.com/>

Vers 1980 : GANTS ET JOYSTRING

“Data gloves” ou gant de donnée fut développé par Thomas Zimmerman et L. Young Harvill comme une main virtuelle. Un aspect important de cette technologie demeure dans le fait qu'elle offre à l'utilisateur la capacité sentir le poids, la texture et la traction des différents matériaux ou objets.

Durant les années 1980, un « joystick » a été développé par Richard Feldman pour générer la force appropriée par la manipulation d'une manette joystick en forme de T. L'ordinateur lit les mouvements de l'utilisateur pour générer la force appropriée.

1992 : CAVE ET C2

En cette année, Tom DeFanti et Carolina Cruz-Neira conçoivent la CAVE. Celui-ci est resté pendant plusieurs années l'appareil le plus sophistiqué et avancé avec des dimensions de

10'x10'x9' pour un théâtre de 3 cotés. L'utilisateur est mis dans un cube et se retrouve entouré d'images projeté en haute résolution et une échelle large lui permettant une expérience immersive et un excellent environnement scientifique de visualisation. Une seconde génération de CAVE suivra appelée le C2 qui attirera plus de recherche scientifique dans l'Iowa State University.

Enfin, il important de noter qu'entre la moitié des années 1980 et le début des années 1990 Les logiciels et le matériel spécialement conçu pour la réalité virtuelle arrive sur le marché et trouve un accès plus large dans les centres de recherche dans le monde. Cela à permis de voir les premiers articles à ce sujet. Il convient aussi de revenir sur le livre de Rheingold [Rhe93] cité plus haut pour lire en détails l'histoire des pionniers de la réalité virtuelle durant le XXè siècle.

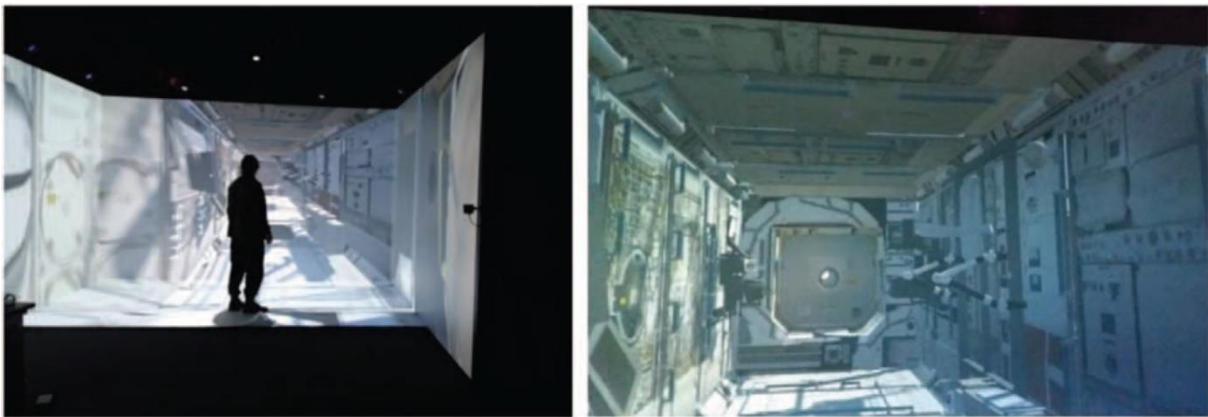


Figure 5 CAVE à 4 côtés du Centre Européen de Réalité Virtuelle de Brest, permettant l'immersion au sein de la Station Spatiale Internationale

Source [BFu19]

D. Etat de l'art

La capacité immersive de la réalité virtuelle porte sur plusieurs applications ; Cela comprend les réhabilitations physiques ou psychologiques, l'éducation ou encore dans l'entraînement physique et l'étude des comportements humains. Néanmoins, un défi persistant dans la création d'environnements virtuels réalistes revient souvent et se caractérise par une certaine sous-évaluation des distances qui se traduit par des environnements virtuels qui paraissent plus petits que leurs équivalents de l'environnement réel.

D.1. Une perception très précise de la distance égocentrique dans le monde réel

Il est important à rappeler d'abord que la perception de la distance égocentrique³ dans un environnement réel est très précise. Une série d'études ont pu mesurer cette perception de différentes manières. Les premiers travaux de J. A. Da Silva (1985) avec le recours à trois méthodes psychophysiques pour mesurer la perception de distance égocentrique sur quatre distances différentes ont montrés des résultats très concluants sur la précision de cette perception. Ces mêmes résultats sont aussi partagés sur les études qu'a mené J. M. Foley (1977) sur la perception de la distance et la portée entre plusieurs cibles de visée. Une autre étude beaucoup plus ancienne dont les résultats convergent dans ce sens fut réalisé par E. J. Gibson (1954) à ce sujet. Dans ces études l'ensemble des résultats des expérimentations furent reportés par l'utilisateur à travers un rapport verbal.

Durant les années 1990 une série d'études seront faites sur ce sujet par la méthode dite de « marche aveugle » (blind walking). L'utilisateur percevait d'abord les cibles disposées sur le terrain avant de fermer les yeux et d'essayer de marcher directement vers leurs localisations ou de pointer continuellement vers elles pendant une marche le long d'un parcours sur le côté. On peut citer à cet effet les travaux de J. M. Loomis, J. A. Da Silva, N. Fujita, S. S. Fukushima (1992) ou de J. M. Loomis, R. L. Klatzky, J. W. Philbeck, R. G. Golledge (1998). Aussi, L'étude de J. J. Riester, D. H. Ashmead, C. R. Talor, G. A. Youngquist (1990) ou de M. J. Sinai, T. L. Ooi, Z. J. He (1998) sur l'influence du terrain sur la perception de distance.

On peut citer une autre méthode dite du « jet » (throwing) qui consiste à jeter un objet vers une localisation déjà perçue auparavant pour désigner son emplacement. Elle fut utilisée dans les travaux de recherche de D. W. Eby et J. M. Loomis (1987) et T. L. Ooi, B. Wu, Z. J. He (2001).

Les dernières méthodes citées ici (le « jet » et la « marche aveugle ») correspondent à ce qu'on appelle des jugements à partir d'action (action-based judgment) se sont révélées, comparée à celle du rapport verbal par exemple, les plus exactes en termes de restitution de perception de la distance égocentrique. Ainsi, elles ont démontré des résultats qui approchent les 100% de précision et confirment bien l'exactitude de la perception de la distance égocentrique dans le monde réel.

³ Distance qu'on définit entre sa personne et un objet.

D.2. Une sous-évaluation de la distance égocentrique dans le monde virtuel pas encore comprise

Durant les 20 dernières années, les chercheurs sont restés perplexes face aux résultats obtenus de la perception qu'ont les sujets/utilisateurs de la distance égocentrique dans l'environnement virtuel et de sa sous-évaluation comparée au monde réel.

Une première approche pour comprendre cela suppose que la solution à ce problème consiste à déterminer les indices de perception⁴ manquants ou peu fiables qui habituellement nous permettent de juger correctement de la distance perçue.

C'est donc dans cette optique que Thompson et al. (2004) se penchent sur la piste de la faible qualité graphique des environnements virtuels. Dans son étude Thompson utilise une méthodologie qui comprend à la fois l'interrogation d'un spectateur fixe et un jugement de distance par action de la part de l'utilisateur (en le faisant marcher aveuglément vers la cible). On présente au sujet deux différents types de rendus visuels sur casque de réalité virtuelle : un de faible qualité graphique et un autre filaire (wireframe). Thompson conclut que la compression de la distance égocentrique perçue dans le monde virtuel arrive indépendamment de la qualité de l'image de synthèse dans laquelle l'utilisateur se trouve immergé.

Dans une autre piste, J. M. Loomis et J. M. Knapp (2004) questionnent le champ visuel réduit des casques de réalité virtuelle comme à l'origine de ce phénomène de sous-évaluation des distances égocentriques. Pour vérifier cela leur expérimentation consistait à recueillir les relevés de distances faits par des observateurs de manière verbale ou par marche aveugle. Les observateurs regardaient de manière binoculaire des cibles (de 2 à 15m de distance) dans un large terrain sous deux contraintes d'observation : la première consiste à ne pas restreindre la largeur du champ visuel et la deuxième consistait à la réduire de la même manière qu'elle le serait sur un casque de réalité virtuelle. Les résultats ont indiqué que la sous-évaluation de la distance égocentrique en réalité virtuelle était indépendante de la largeur du champ visuel de l'observateur.

Sur la même piste S. H. Creem-Regehr, P. Willemsen, A. A. Gooch, W. Thompson (2005) ont pu vérifier dans leurs expérimentations qui portent sur presque la même méthode que la visibilité du corps de l'observateur et de ses pieds sur le sol n'étaient pas nécessaire pour une perception précise de la distance. Ils ont aussi confirmé que la largeur du champ visuel était indépendante du rétrécissement de la perception des distances chez l'observateur.

Le même groupe de chercheurs constitué de P. Willemsen, A. A. Gooch, W. B. Thompson et S.H. Creem-Regehr (2008) ont vérifié une autre hypothèse qui consiste à dire que le problème venait de l'inexactitude des rendus stéréoscopiques des casques de réalité virtuelle. Dans leur expérimentation, les chercheurs utilisaient des distances intraoculaires fixes dans le visio-casque ou des distances intraoculaires adaptées aux yeux des utilisateurs. Aussi, ils ont expérimenté cela sur une vision stéréoscopique bi-oculaire et sur une vision monoculaire. Les résultats obtenus ont montré que le rétrécissement des perceptions de la distance égocentrique était indépendant de ces paramètres.

⁴ Voir étude de J. R. Tresilian, M. Mon-Williams et B. M. Kelly « Increasing confidence in vergence as a cue to distance » (1999)

Une année après, ce groupe de chercheurs de P. Willemsen, A. A. Gooch, W. B. Thompson et S.H. Creem-Regehr (2009) se mettent sur une différente hypothèse qui désigne la masse du visio-casque et le moment d'inertie qu'il crée sur la tête de l'observateur comme à l'origine du rétrécissement de la perception des distances dans l'environnement virtuel. Dans leur expérimentation l'équipe de chercheurs met une maquette de visio-casque qui reproduit le même poids sur la tête de l'observateur de la même manière que le ferait le vrai visio-casque de réalité virtuelle et ceux afin d'exercer le même poids et le même moment d'inertie sur la tête durant l'observation dans le monde réel. Leurs résultats bien qu'ils aient montré une certaine réduction de la perception de la distance égocentrique, cette dernière n'a pas pu être statistiquement significative par rapport à celle qu'on observe habituellement dans une immersion dans un monde virtuel par visio-casque.

Les quatre hypothèses citées ci-dessus et les résultats scientifiques obtenus durant les années 2000 n'ont, en majeure partie, pas pu expliquer le rétrécissement de la perception de la distance égocentrique dans l'EV. Pourtant, ils ne seront pas écartés de manière définitive. En effet, l'avancement technologique rapide durant ces deux dernières décennies dans le développement de matériel graphique plus puissant et des rendus d'images de synthèses plus poussées ont menés à revoir des expérimentations déjà effectuées par le passé.

Ainsi, le groupe de chercheurs de l'Université de Utah constitué du B. R. Kunz, L. Wouters, D. Smith, W. B. Thompson et S. H. Creem-Regehr (2009) vont revisiter l'hypothèse de la qualité graphique de l'environnement virtuel comme à l'origine de la sous-évaluation de la distance égocentrique en EV. L'expérimentation portera sur la même méthode que celle à laquelle ils ont eu recours en 2004. À la différence que les chercheurs n'auront pas à comparer entre une image de faible qualité et une autre filaire (wireframe), mais plutôt sur une image de faible qualité et une deuxième de haute qualité. Dans l'Expérimentation n°1, en effectuant une restitution de la perception par marche aveugle, les participants ont montré la même sous-évaluation des distances en image de faible qualité qu'en image de haute qualité. Mais dans l'Expérimentation n°2, les restitutions de participants par jugement verbal, même si elles sous-évaluaient toujours les distances, étaient cette fois-ci plus précises sur les graphiques de haute qualité. À cela s'ajoute que les participants soulignaient systématiquement de manière subjective l'impression que les environnements en haute qualité paraissaient plus larges. Le groupe de chercheurs suggère alors que contrairement à ce qui a été dit dans des études précédentes, la qualité graphique des environnements virtuels peut influencer sur l'appréciation des distances mais uniquement par jugement verbal.

En parallèle de la première approche basée sur les indices de perception, les chercheurs suivent une deuxième approche. Ils interrogent l'effet que peut avoir une interaction sur l'environnement virtuel et sur l'appréciation des distances dans celui-ci, et à quel degré cette interaction serait nécessaire pour la juste évaluation des distances par le sujet/participant.

B. J. Mohler, S.H. Creem-Regehr, W. B. Thompson (2006) ont porté cette interrogation dans leur étude. Les résultats ont montré une amélioration de l'appréciation de la distance égocentrique quand on procure aux participants un retour d'information continu lors de leur

déambulation au début de l'expérimentation. Cette amélioration est de 73% à 91% par marche aveugle et de 72% à 95% pour les rapports verbaux.

A. R. Richardson, D. Walker (2005) ont, eux aussi dans leur expérimentation démontré que le retour d'information était nécessaire pour améliorer l'appréciation des distances par les participants.

Un peu plus tard le même groupe A. R. Richardson, D. Walker (2007) vont confirmer une nouvelle fois leurs conclusion en obtenant une différence significative entre le groupe de participants qui n'ont pas reçu le retour d'information continu et le groupe qui l'a eu. L'exactitude de l'estimation de la distance égocentrique était quasi-exacte.

Dans l'étude suivante et de manière plus approfondie, A. R. Richardson, D. Walker (2008) vont même après trois expérimentations conclure que l'interaction brève en déambulant avant d'estimer la distance en EV activait un recalibrage du système perceptif-moteur du participant. Aussi, on a pu démontrer que l'appréciation de la distance est non affectée si les participants observent uniquement une simulation de déambulation (flux visuel uniquement) indiquant la nécessité d'inclure un mouvement du corps (body-based movement) lors de cette déambulation. La dernière expérimentation a permis de conclure qu'il n'était pas nécessaire d'aller vers la cible durant la phase de déambulation.

J.W. Kelly, L. S. Donaldson, L. A. Sjolund, J. B. Freiberg (2013) émettent la même hypothèse qu'une brève période d'interaction dans la laquelle les participants déambulent dans l'environnement virtuel (tout en continuant à obtenir un retour d'information sur celui-ci) permet d'améliorer l'appréciation des distances dans l'EV. Pour vérifier cela, ils procèdent à deux expérimentations. L'Expérience 1 consiste à demander aux participants des appréciations de distance avant d'interagir. Après une comparaison des résultats d'évaluation des distances avant-interaction et après interaction, ceux-ci ont montré clairement que l'appréciation des distances est grandement améliorée par l'interaction du participant en déambulant brièvement dans l'EV.

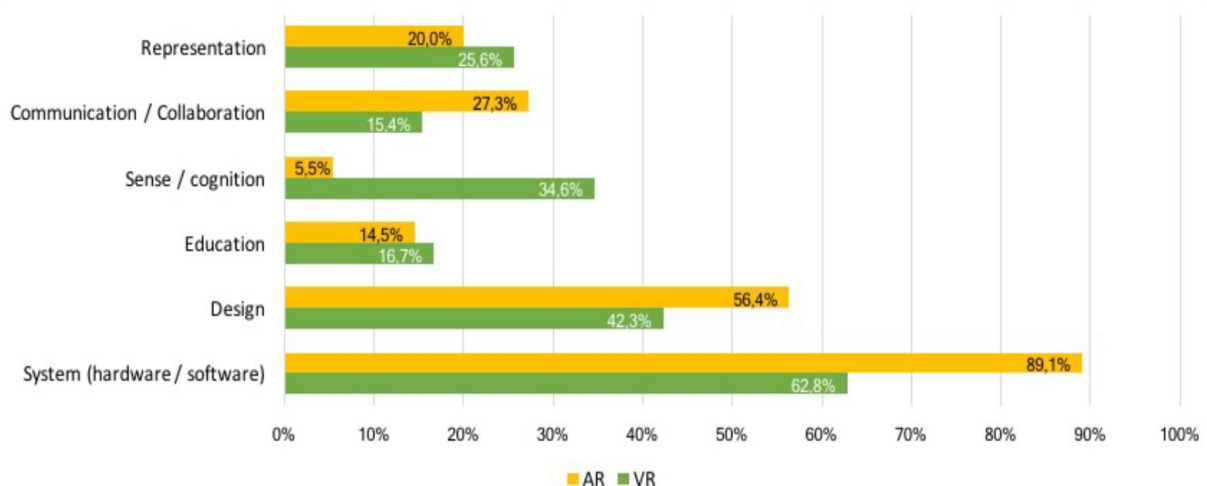
B. R. Kunz, S. H. Creem-Regehr et W. B. Thompson (2015) vont s'interroger sur les mécanismes derrière cette amélioration de l'appréciation de la distance égocentrique liée à une déambulation dans l'EV qui la précédé. Pour répondre à cela, le groupe de chercheurs a créé une non concordance délibérée entre les indicateurs biomécaniques et les indicateurs visuels de mouvements des participants dans l'EV. Ils ont ensuite mesuré les effets sous-jacents sur l'appréciation des distances. Les résultats suggèrent une influence du retour d'information de nature visio-motrice sur l'évaluation de la distance en recalibrant les relations psychomotrices du participant.

Les travaux de Z. D. Siegel, J. W. Kelly et L. A. Cherep (2017) de l'Université d'Iowa vont même prouver que ce recalibrage des relations psychomotrices des participants peut être transféré dans un autre environnement virtuel et qu'on peut même continuer à améliorer notre appréciation des distances en continuant à déambuler dans ce deuxième environnement.

Ainsi, au vu des études citées ci-dessus, il paraît aujourd'hui que l'hypothèse de pré-interaction par déambulation est la plus prometteuse et l'unique en terme d'efficacité pour palier au problème de rétrécissement des distances lors d'une immersion en EV. Qu'en est-il en architecture, peut-on nous passer de cet impératif lors d'une application architecturale de la réalité virtuelle ?

Une méconnaissance de la sous-évaluation de la distance égocentrique dans les applications architecturales de la réalité virtuelle

J. Milovanovic, G. Moreau, D. Siret et F. Miguet (2017) interrogent dans leur étude la réalité virtuelle et la réalité augmentée dans la conception et l'éducation architecturale. De la sélection de 122 articles qu'ils citent et analysent de la base de données Cumincad (Cumulative Index of Computer Aided Architectural Design), ils classent ces derniers en six catégories indiquées dans le schéma suivant :



Prévalence des sujets dominants sur les articles analysés, Source : J. Milovanovic, G. Moreau, D. Siret et F. Miguet (2017)

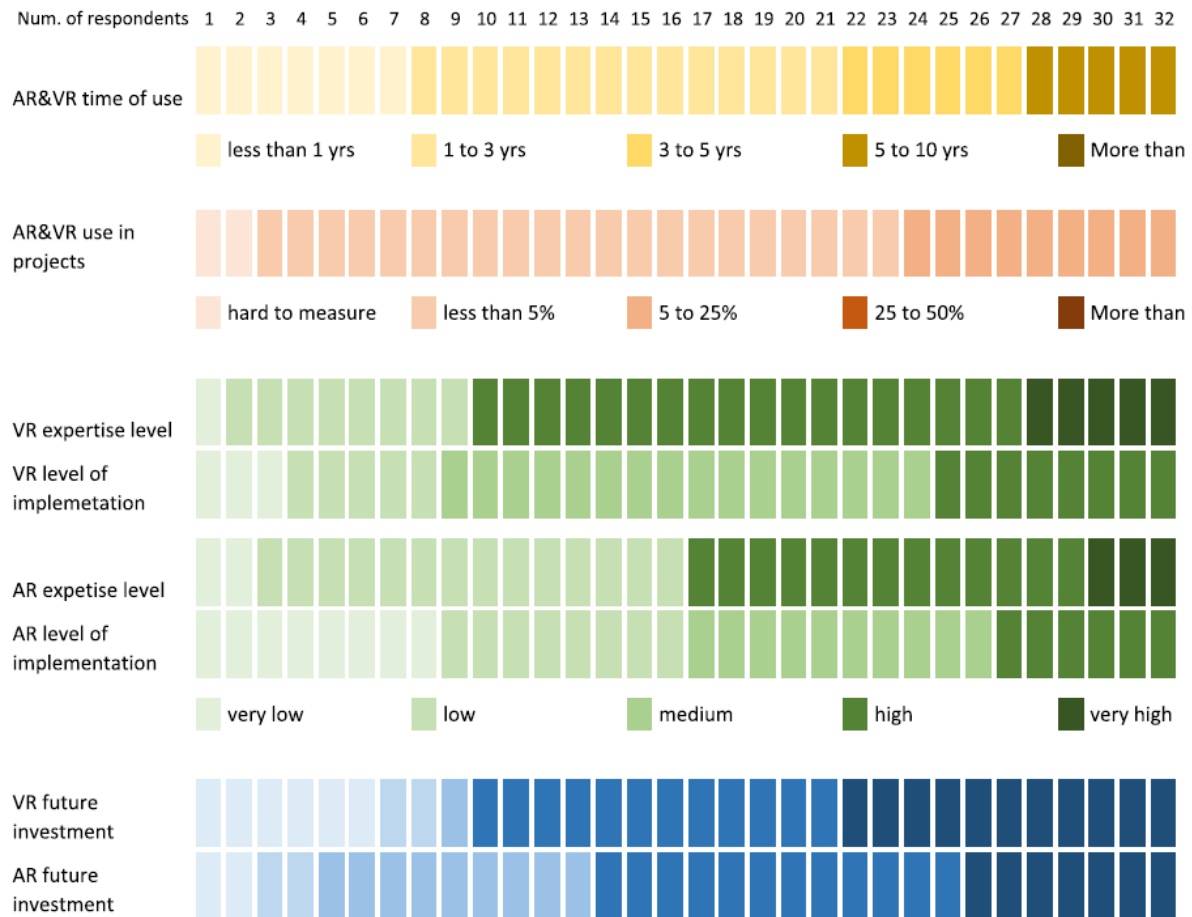
Cette figure montre que 34,6% des articles étudiant la réalité virtuelle en architecture traitent du sujet des sens/cognition. Pourtant, il n'y a aucune mention du problème de rétrécissement de la perception de la distance égocentrique expérimentée par les utilisateurs dans ces articles.

Cette remarque nous interroge tout autant que selon les travaux de Thompson, Creem-Regehr, Kelly et d'autres chercheurs cités plus haut la sous-évaluation de la distance égocentrique perçue en EV varie de 50% à 70% des distances perçues du monde réel. Ce qui devrait être très notable.

Un début d'explication peut être dans le fait que la réalité virtuelle ne s'est popularisée dans les applications architecturales que récemment, en comparaison aux autres secteurs, et n'est donc pas assez mature dans son application pour distinguer ce problème. En effet, la réalité virtuelle a fait d'abord ses débuts d'application dans le domaine de l'aéronautique et du spatiale dès la deuxième moitié du XXe siècle. Un peu après, c'était le domaine de l'automobile qui lui trouve un intérêt dans la conception, la fabrication et le test de ses prototypes de voitures. En parallèle le secteur de la santé trouve à la réalité virtuelle des applications dans le domaine de la réhabilitation physique et psychologique. Aussi l'industrie lui trouve des applications notamment dans le domaine de la formation. Pour l'architecture, il a fallu attendre l'engouement du monde des jeux vidéo et un certain développement des qualités graphiques du matériel de réalité virtuelle pour y voir un réel intérêt.

Encore aujourd'hui, et malgré la popularisation croissante de la réalité virtuelle par le biais de visio-casques bon marché, le recours à la réalité virtuelle dans les agences d'architecture ou dans l'éducation architecturale reste très minime. Les résultats de l'étude de D. Delgado, J. Manuel, L. Ovedele et P. Demian (2020) sur la réalité virtuelle et augmentée dans le secteur du BTP montrent que 60% des entreprises ont testé la RV/RA depuis moins de trois ans. Et ~62% des entreprises ont utilisée la RV/RA dans 5% de leurs projets. Environ 80% des participants

considèrent qu'ils ont un niveau intermédiaire en RV. 8,8% disent que leur entreprise n'a pas eu recours à la RV ; 14,7% sont dans les premiers test sans l'implication du client ; 47,1% une implémentation basique dans des projets pilotes avec des clients ou en interne ; 26,5% l'utilise partiellement et sur jusqu'à 25% des projets avec les clients et seulement 2,9% qui l'utilise totalement avec plus de 25% de leurs projets avec des clients.



Les niveaux généraux d'adoption, d'expertise, d'implémentation et de futur investissement en RV et RA, source : D. Delgado, J. Manuel, L. Ovedele et P. Demian (2020)

Concernant les exigences techniques que peuvent avoir les utilisateurs de la réalité virtuelle dans le domaine de la construction et de l'architecture, la précision figure parmi les six plus importantes. Ainsi, l'étude suggère qu'il n'y aura pas d'ascension spectaculaire dans l'usage de la réalité virtuelle dans le domaine du BTP tant que celle-ci n'atteint pas un certain niveau de précision. En effet, des outils de RV imprécis mènent à des erreurs conséquentes. Par exemple, une mauvaise appréciation de l'emplacement d'un conduit enfuit sous terre va décourager à avoir recours à la réalité virtuelle pour éviter le risque de le perforer. Formaliser de manière claire cette marge d'erreur et identifier les sources d'erreurs sont très importants pour une application sérieuse de la réalité virtuelle.

L'intérêt de notre travail ici est alors d'autant plus important pour réduire l'étanchéité entre les travaux qui portent sur les sens/cognition du domaine de la psychologie et ceux qui relèvent de réelle applications et expérimentations de la réalité virtuelle architecture.

E. Applications de la réalité virtuelle

Comparée aux autres filières, celle du BTP (Bâtiment et Travaux Publics) s'est mise assez tardivement à la technique de réalité virtuelle dans leurs projets. Néanmoins on constate une accélération ces dernières années qui se généralise avec la présence de la maquette numérique dans les échanges entre les différents acteurs ou agents de la filière.

La réalité virtuelle constitue le prolongement de la maquette numérique. La perception d'un projet architectural est ainsi favorisée par la visite d'un bâtiment virtuel mis à l'échelle 1 :1 avec un accès à l'ensemble de ces espaces intérieurs. Cela permet aussi de participer à son aménagement et à sa compréhension facilitant ainsi le processus de prise de décision.

Cette réalité n'est pas seulement celle du concepteur, en l'occurrence ici l'architecte. Un particulier qui visite un bien immobilier dans le but de l'acquérir ou le louer peut, avant son achèvement, inspecter son futur état dans sa version virtuelle. On peut citer l'exemple de JLL qui à travers un casque de réalité virtuelle donne la possibilité à ses clients de visiter virtuellement leurs futurs locaux.

Le groupe Legendre donne la capacité au client ou promoteur de parcourir le futur projet architectural pour ensuite donner son retour et proposer des modifications selon sa convenance.

La réalité virtuelle est aussi utilisée dans la formation professionnelle dans le secteur du BTP. C'est le cas d'une coopération entre Bouygues Construction et HTC pour la prévention des risques sur les sites de construction et de sécurité sur les chantiers.

La RV offre aussi au citoyen de mieux s'outiller lors des concertations dans les grands projets d'aménagement. Immersion a ainsi mis à disposition des citoyens pour le réaménagement du quartier Bastide Niel à Bordeaux (35 hectares) la possibilité de visiter des appartements et de se situer par rapport aux différents programmes du projet.

Aussi, la RV ne se limite pas seulement à l'interface du visio-casque pour trouver des applications dans le monde de l'architecture. Un système CAVE dédié aux bâtiments fut installé pour la première fois en 2014 à Guyancourt au siège de Bouygues Construction pour aider à la conception et participer aux autres missions des acteurs du domaine.

Il paraît de manière certaine qu'avec la généralisation du BIM et la démocratisation croissante des interfaces de réalité virtuelle avec des coûts de moins en moins chers et une prise en main plus facile vont permettre à la réalité virtuelle de se développer encore comme outils complémentaire essentiels.

« ...[la réalité virtuelle] est un outil d'aide à la décision ou à la conception pour l'architecte, qui visualise le projet architectural, ses variantes, l'intégration dans l'environnement réel. C'est également utile lors des réunions sur place avec les élus locaux ou le futur acquéreur, qui a possibilité de voir le futur bâtiment en situation. »

Xavier Gallée, responsable commercial pour l'industrie Artefacto, agence spécialisée dans la RA, RV et la modélisation 3D

[Mon17]

F. Interfaces visuelles portables : Le visio-casque

Depuis le premier casque de Daniel Vickers dans les années 1970, les visio-casques connaissent aujourd'hui une popularité croissante chez le grand public. Aussi appelé casque immersifs ou HMD (Head Mounted Display) ces appareils sont avant tout un matériel pour la vision capable de fournir une vision stéréoscopique, un large champ visuel et une immersion du regard pour son utilisateur.

Le visio-casque est constitué d'un ou de plusieurs capteurs qui détectent les mouvements de la tête⁵ de l'utilisateur et ainsi orienter l'image en adéquation avec cette dernière.

Le large champ visuel permet de regarder (théoriquement seulement) en 360° en tournant la tête. Mais à position fixe. Le champ de vision s'approche de celui des yeux mais sans être tout à fait équivalent⁶.

Il est important de comprendre que dans la vision humaine naturelle on voit net uniquement ce qui est dans le centre de la vision. Ce n'est à ce jour pas encore le cas dans les visio-casque où le champ de vision est plus étroit et donc ne permet pas au réflexe naturel de tourner la tête pour la positionner sur un objet qui est décentré dans notre champ de vision. À contrario, si les constructeurs venaient à écarter les deux afficheurs écrans pour élargir le champ de vision, ceci réduirait l'angle de superposition des images (œil gauche et droit) faisant ainsi une image avec une stéréoscopie moins efficace avec des difficultés à afficher des profondeurs ou des reliefs.

Enfin, il convient de noter qu'en plus de dispositif visuel des visio-casques, ils sont aussi équipés d'écouteurs capable de diffuser le son de manière stéréo ou 3D. Ce dernier point ne sera pas abordé dans notre travail car nous nous concentrons uniquement sur l'aspect qui concerne la vision humaine et l'immersion « visuelle » en visio-casque.

F.1. L'architecture d'un visio-casque

Fuchs [Fuc13] décrit qu'un visio-casque doit présenter des fonctionnalités principales pour être une interface visuelle efficace :

1. Un large champ visuel
2. Une immersion du regard
3. Une vision stéréoscopique
4. Une grande résolution.

- 1- Le large champ visuel : Comme il a été cité plus haut, il s'agit là du premier défi pour les constructeurs. Il faut pour avoir un grand champ visuel rapprocher les deux écrans

⁵ À ne pas confondre mouvement de la tête et mouvement des yeux. Car si les visio-casques arrivent à suivre les mouvements de la tête. Aucun à ce jour n'arrive à suivre les mouvements des yeux de l'utilisateur.

⁶ Fuchs [Fuc13] parle de 120° maximum pour les visiocasques actuels sur le marché contre 180° pour le champ visuel naturel des yeux en horizontale.

aux yeux de l'utilisateur. En contrepartie, un nombre de problèmes est à gérer, parmi ceux-là on peut en citer deux :

- a. L'accommodation des yeux est perturbée à cause de la proximité des écrans par rapport aux yeux. Pour remédier à cela il faut nécessairement ajouter un dispositif optique à large champ visuel.
- b. La grande proximité des écrans par rapport aux yeux fait que la trame des pixels se fait voir et nécessite au moins d'ajouter des diffuseurs pour masquer cela⁷. L'autre solution serait d'augmenter la densité de pixels sur la petite surface des écrans, ce qui est en soit techniquement difficile et coûteux à réaliser.

Ces deux problèmes reflètent tout à fait le défi de visio-casque qui consiste à faire un grand champ visuel avec deux petits écrans situés à quelques centimètres des yeux.

- 2- Une immersion du regard : Comme il a été souligné plus haut, il est impossible pour l'utilisateur de pleinement être en réalité virtuelle s'il n'est pas en immersion dans le monde virtuel. Cela revient à dire que l'usage du visio-casque et sa présence matérielle « se fait oublier » par l'utilisateur et qu'il ne se concentre que sur l'expérience que lui offre le visio-casque. Pour cela, l'ergonomie de l'interface visuelle doit être confortable (poids, aération, stabilité des attaches, etc.).
- 3- Une vision stéréoscopique : Celle-ci est obtenue en projetant deux images adéquates pour chaque œil de l'utilisateur. Souvent dans les visio-casques, Fuch [] souligne que les constructeurs en recherche d'un champ visuel le plus large possible, n'hésitent pas à créer une zone réduite de recouvrement stéréoscopique (overlap)⁸.

On peut résumer ses fonctionnalités en s'appuyant sur le schéma de Fuchs [Fuc13], où il les ordonne par ordre de difficulté croissante :

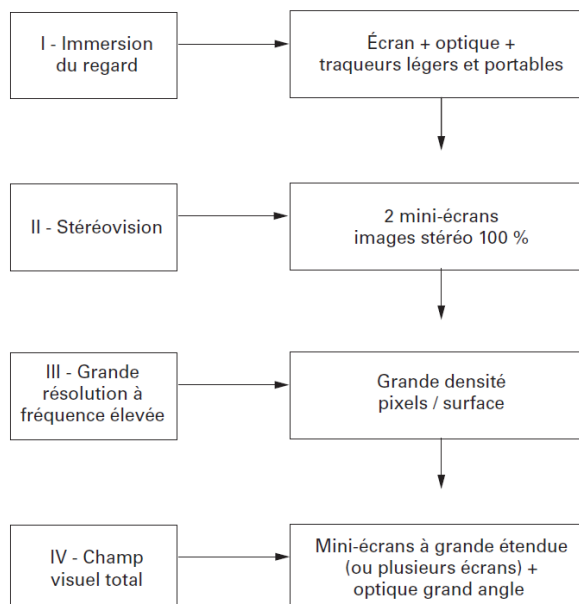


Figure 6 Contraintes technologiques pour la conception d'une interface de vision individuelle.

Source : Fuchs [Fuc13]

⁷ Vous pouvez tester cela en vous mettant à quelques centimètres de votre écran d'ordinateur ou télévision pour apercevoir le damier des pixels de celle-ci.

⁸ Il convient à ne pas être en dessous de 70% de superposition des deux images, sinon la vision en relief est largement réduite.

F.2. Qualité visuelle des visio-casques

Si les premiers visio-casques ont eu beaucoup de mal face aux défis cités précédemment ceux qui sont disponible aujourd'hui sur le marché n'ont pas pu encore tout résoudre. La grande différence entre les deux périodes réside dans le fait que le développement technologique des smartphones a réduit les couts de fabrication des écrans et du matériel informatiques lié faisant parvenir ainsi des visio-casques moins onéreux et d'une qualité plus ou moins acceptables.

Un point important à souligner demeure dans la qualité visuelle des visio-casques disponibles sur le marché comparé à d'autres interfaces visuelles pour la réalité virtuelle ou la vision humaine. Comme le montre le graphique d'O. Hugues [Fuc16], les visio-casques actuels peinent à rivaliser avec d'autres interfaces comme le CAVE et encore plus loin de la vision humaine.

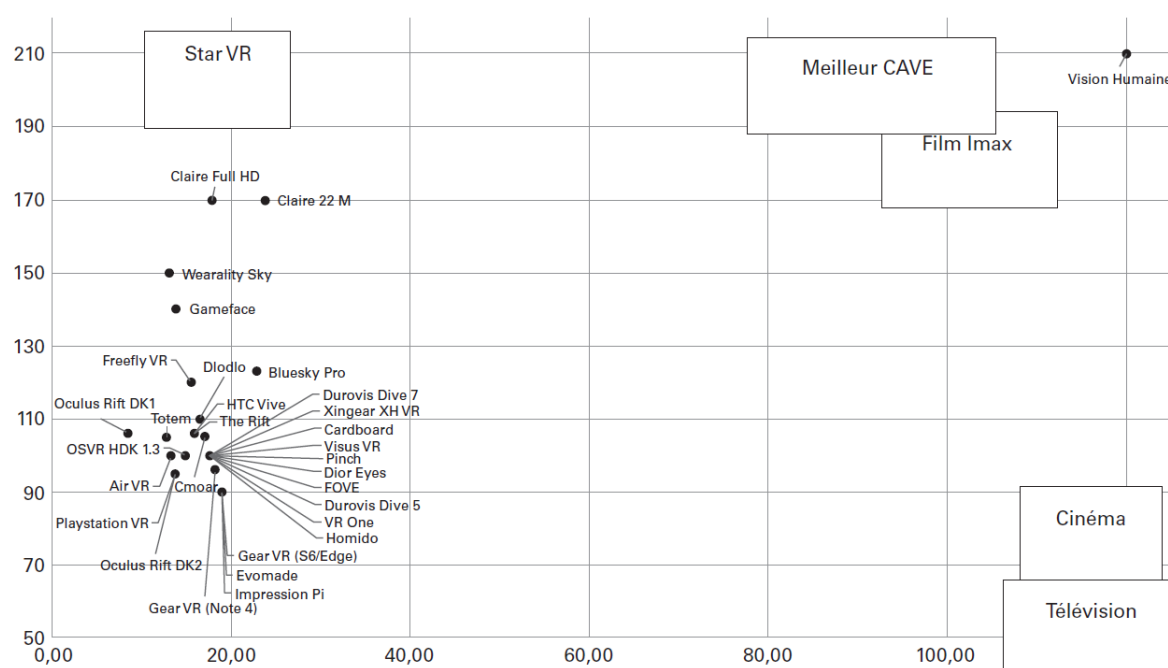


Figure 7 Répartition des visiocasques selon leur champ de vision horizontal (axe vertical, en degrés) et leur densité de pixel (axe horizontal, en pixels par degré) et comparaison avec d'autres interfaces visuelles.

Source : O.Hugues, 2016

« ...Pour tous les visiocasques, la qualité visuelle est primordiale mais elle est, hélas bien faible par rapport aux capacités visuelles humaines. Elle se mesure en premier par la densité de pixel : exprimée en nombre de pixels par degré (ppd), elle traduit la résolution du dispositif, indépendamment du champ de vision qu'il offre. Rappelons que cette densité doit être comparée avec l'acuité visuelle de l'utilisateur, dont la moyenne est de l'ordre de 0,5 à 1 une minute d'angle. La densité de pixels de la plupart des dispositifs inventoriés en 2016 est de l'ordre de 20ppd alors que le système visuel nécessiterait au minimum 120 ppd. Par ailleurs, l'ordre de grandeur du champ de vision horizontal de la grande majorité des visiocasques est de l'ordre de 100° à 120°. »

Fuchs [Fuc19]

G. La vision Stéréoscopique

La création d'images stéréoscopiques repose sur le principe technique suivant : Il s'agit de faire en sorte que chaque œil voit une image qui lui correspond. On en aura donc deux images. Elles sont soit projeté chacune dans l'œil correspondant par deux écrans (le cas du visio-casque) ou projetée ensemble sur un plan puis l'utilisateur qui met en place un dispositif technique particulier qui permet a chaque œil de voir l'image sur le plan qui lui est destinée.

La distance entre les deux points (un sur chaque image) qui correspondent à une position dans l'espace est appelée parallaxe. C'est cette dernière qui crée une disparité rétinienne et permet de sentir l'effet de profondeur de la stéréoscopie.

Ce qui est important à retenir est que l'effet de profondeur que fait sentir une création stéréoscopique peut être similaire à celle ressentie dans une vision spatiale réelle mais ne peut en aucun cas être identique à celui-ci⁹.

Il existe trois valeurs de parallaxe selon la distance de l'objet observé et l'écran :

Parallaxe positive : si l'objet observé se situe virtuellement derrière l'écran.

Parallaxe nulle : si l'objet observé virtuellement est à même l'écran.

Parallaxe négative : si l'objet observé virtuellement se situe devant l'écran.

Il est important de noter un certain nombre de paramètres à respecter :

- 1- La parallaxe doit rester petite afin d'éviter des difficultés pour le cerveau à fusionner les deux images, et s'il le fait, ce sera avec une grande fatigue.
- 2- Il convient de garder une seule distance face à l'écran dans lequel on observe les objets en question (aussi appelé distance orthostéréoscopique) car plus l'observateur s'éloigne de l'écran plus la profondeur des reliefs ressentie est grande.
- 3- L'écartement des axes optiques des caméras pour simuler une vision stéréoscopique doit être égal¹⁰ à la DIO (Distance Intra Oculaire de 65mm en moyenne).

Enfin, chaque utilisateur réagit différemment devant la vision en relief avec plus ou moins de répercussions derrière (fatigue, impossibilité de fusion des deux images, etc.).

⁹ Les projections géométriques planes pour créer des images et transformé en stéréoscopie induisent des contraintes géométriques et psychophysiques que la vision spatiale n'a pas.

¹⁰ Sauf si on veut simuler une vision de vue aérienne stéréoscopique ou d'objet minuscule comme pour des insectes.

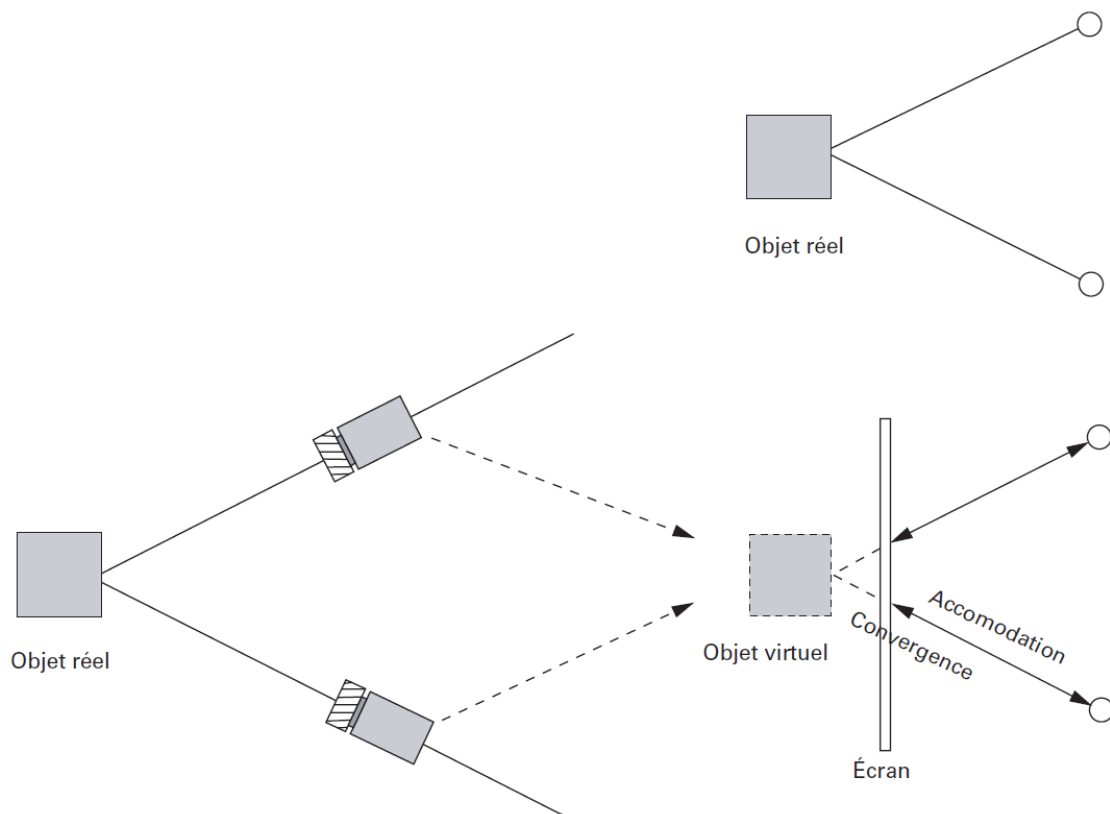


Figure 8 Différence entre vision naturelle (en haut) et une restitution stéréoscopique (en bas)

G.1. La vision humaine : accommodation et (con)vergence

Afin de garantir un confort visuel et une observation correcte pour l'être humain des objets qui l'entoure notre système oculomoteur permet d'effectuer à nos yeux des mouvements indispensables sans lesquels la perception visuelle des objets serait impossible.

Ici on parle de deux mouvements en particulier ; l'accommodation et la (con)vergence.

G.1.1. L'accommodation

Le phénomène d'accommodation se passe dans chaque œil. La forme du cristallin change afin de mettre au point sur la rétine des objets proches ou éloignés. La netteté des flux lumineux dépend justement de ce phénomène qui fait en sorte que les rayons lumineux soient déviés vers la zone centrale de la rétine ou on trouve la macula qui contient elle-même la zone appelée la fovéa.

L'utilisateur d'appareil photo peut être familier à ce phénomène puisqu'on l'utilise presque quotidiennement sur nos smartphones avec l'option auto-focus lorsqu'on veut prendre une photo. Ce qui rend l'objet proche net et les autres flous ou inversement.

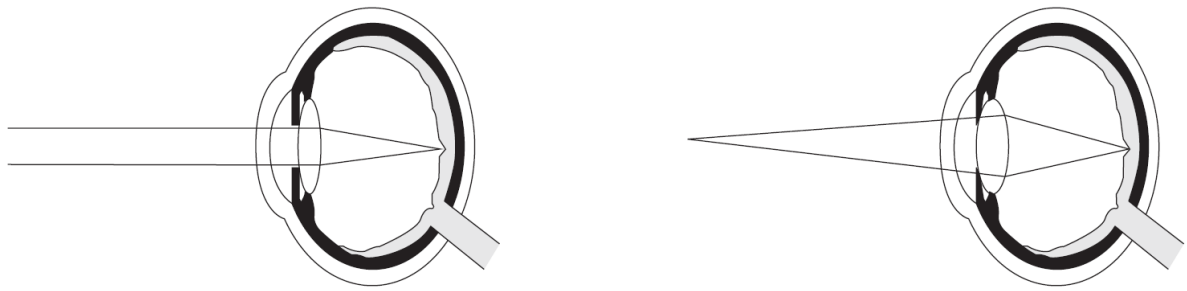


Figure 9 Schéma optique simplifié du phénomène d'accommodation par changement de forme du cristallin

Source [BFu19]

G.1.2. La vergence

Le phénomène de (con)vergence est le résultat du mouvement des muscles orbitaux afin de modifier la direction du regard vers l'objet ou l'endroit observé. Ce mouvement est très rapide et est de l'ordre de $500^\circ/\text{s}$ environ.

L'accommodation et la (con)vergence travaillent ensemble ; si les deux concentrent l'attention de la perception sur un objet en particulier, la (con)vergence fait bouger les yeux vers celui-ci et l'accommodation fait en sorte qu'il soit net en veillant à « flouter » le reste. On peut ainsi dire que les deux phénomènes entraînent l'un et l'autre et sont en relation entre eux. Les deux phénomènes sont d'ailleurs faits de manière inconsciente mais pas innée¹¹.

Concernant la vergence, la disparité rétinienne quand elle est trop grande entre l'objet fixé et les autres qui l'entoure fait que le cerveau ne peut pas fusionner les deux images venues de chaque œil. Il choisit alors de fusionner (et donc de créer un effet de profondeur) uniquement pour là où la vergence mène et laisse les autres objets dédoublés. Ça sera alors à l'accommodation de faire en sorte que l'objet fixé soit net et de « flouter » les autres objets dédoublés.

Un simple exemple cité par Fuchs et Bernard [BFu19] est celui de fixer son doigt puis un objet (comme un arbre par exemple) en arrière-plan. Vous verrez que si vous fixez l'arbre votre doigt se dédouble et inversement si vous fixez votre doigt l'arbre en arrière-plan se dédouble.

¹¹ La maîtrise de l'accommodation et de la convergence s'apprend progressivement et inconsciemment à l'enfance.

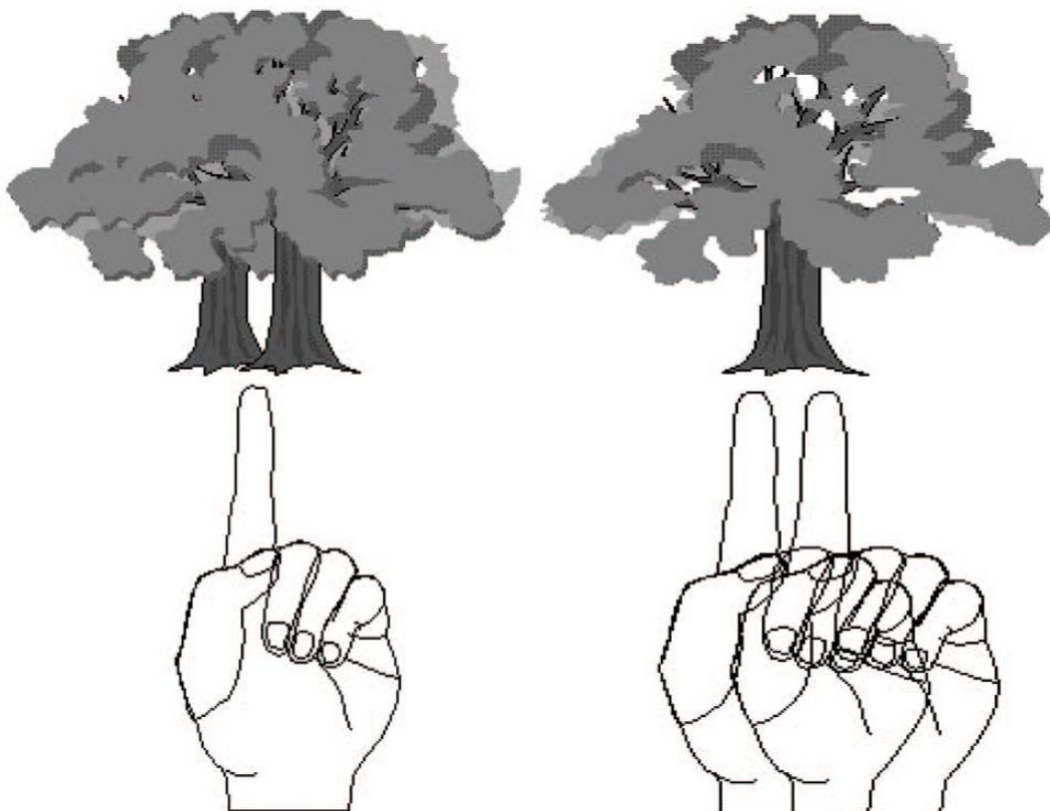


Figure 10 perspective d'un observateur qui fixe son doigt (à gauche) puis l'arbre en arrière-plan (à droite)

Source [BFu19]

G.1.3. Incohérences oculomotrices liées au visio-casque

Comme il a été affirmé plus haut, la restitution stéréoscopique peut s'approcher de la vision spatiale réelle mais jamais en être identique. Un des facteurs qui souligne cette différence est justement l'incohérence « accommodation-(con)vergence ». Il s'agit en fait d'un gêne quand les disparités rétinienne imposées par le visio-casque aux yeux de l'observateurs sont au-delà du seuil de tolérance¹² de l'utilisateur.

Plus concrètement, Sur un visio-casque, les yeux de l'utilisateur convergent sur l'objet perçu dans l'environnement virtuel mais l'accommodation elle reste fixe vu que la distance entre l'écran et les yeux reste toujours la même. Tous les objets sont alors indépendamment qu'on les fixe des yeux ou pas restent nets d'où l'incohérence oculomotrice.

¹² Dans certains cas, c'est l'utilisateur lui-même qui a un seuil de zéro, c'est-à-dire qu'il est incapable de fusionner deux images pour simuler une stéréoscopie sur un visio-casque. Dans d'autres cas, c'est le temps d'exposition très long qui active cette gêne.

H. Les environnements virtuels 3D

H.1. Terminologie et définition

Bouville [Bou16] présente l'environnement virtuel 3D comme un terme qui englobe de façon suffisamment vaste les applications 3D habituellement utilisées pour la réalité virtuelle. Elle souligne notamment la grande disparité qui règne sur les termes qui désignent la notion d'environnement virtuel. En effet, on peut trouver différentes appellations comme : monde virtuel, espace virtuel ou univers virtuel. L'ensemble de ces termes ont comme point commun la référence d'une manière ou d'une autre à la réalité virtuelle qu'elle qu'en soit la nuance.

H.2. Caractéristiques des environnement virtuels

La finalité l'application de la réalité virtuelle détermine les caractéristiques qui vont y être introduit. De ce fait Bouville [Bou16] explique qu'en plus du réalisme ou de l'étendu de l'environnement virtuel, celui-ci peut avoir plusieurs options dont on peut en citer :

- Apparition de l'utilisateur sous forme d'avatar¹³.
- Capacité d'action de création de l'utilisateur à l'intérieur du monde virtuel.
- Possibilité d'interaction avec d'autres utilisateurs dans le monde virtuel.
- Possibilité de partage de l'environnement virtuel avec d'autres utilisateurs.

C'est donc vraiment une question d'efficacité et d'optimisation entre l'objectif souhaité et les options possibles qui déterminent quel type d'environnement virtuel a-t-on besoin pour une immersion en réalité virtuelle réussie.

Les propriétés d'une scène 3D

- **Le point de vue.** Ce paramètre permet de définir le placement de la caméra pour déterminer l'angle de vision de la scène.
- **La navigation.** Ce paramètre permet de définir la façon dont la caméra va se placer dans la scène. Par exemple, elle peut survoler les objets de la scène, tourner autour, se déplacer au niveau du sol à la manière d'un piéton.
- **L'éclairage.** Ce paramètre décrit la façon dont la scène va être illuminée à partir des trois composantes d'éclairage : diffus, spéculaire et ambiant...
- **Le partitionnement.** Ce paramètre définit un découpage de la scène qui permet d'optimiser certains traitements de rendu. Il existe entre autres des partitionnements sous forme de grille 2D ou 3D... ou des partitionnements de la scène liés à la visibilité...
- **Autres.** Une texture pour sol, une ou plusieurs textures pour l'horizon, une piste audio ou encore des hyperliens peuvent également être définis pour décrire une scène.

[Bou16]

¹³ Personnage virtuel qui représente l'utilisateur dans le monde virtuel

2. APPROCHE PRATIQUE : EXPERIMENTATION DE LA PERCEPTION SPATIALE EN VISIOCASQUE

A. INTRODUCTION

A.1. Construction de l'environnement spatial

La perception dans de bonnes proportions des différentes formes et distances en réalité virtuelle est importante dans de nombreux domaines, on imagine bien que la conception d'espaces pour lesquelles la perception des bonnes dimensions est importante, et ne peut se baser que sur un système de rendu en réalité virtuelle qui offre une reproduction maîtrisée et qui se rapproche au maximum de l'aspect final réel. Une perception erronée des proportions spatiales risque de fausser voir de nous induire en erreur pour l'appréciation de l'espace architectural et ainsi compromettre une éventuelle prise de décision.

Quel crédit apporter aux différentes proportions et distances (longueur, largeur, hauteur) d'un espace visualisé en réalité virtuelle ?

A.2. Objectifs

Dans cette partie, on abordera les différentes questions de la perception des tailles et formes d'espaces, on exposera ainsi deux expériences de rendu d'image en RV type stéréoscopique, puis une visualisation par visiocasque, le but de nos prochaines expérimentations est de comparer deux espaces réelles avec leurs équivalents virtuels. Les résultats du type de rendu et de visualisation ouvrent une discussion sur les limites et évolutions possibles des méthodes et techniques utilisées.

RV / monde réel : à partir d'une expérience, reconnaître les proportions d'un espace architectural simulé en RV dont les proportions et les couleurs varient légèrement.

A.3. Méthode de génération des images en RV et choix des softwares :



Nous considérons dans ce chapitre l'utilisation de différentes familles d'outils accessible aux étudiants en école d'architecture.

A.3.1. Les outils de capture d'information :

Pour réaliser notre expérimentation, nous procéderons dans un premier temps à la reconstruction de la documentation (plans, coupes) soit au relevé des différents espaces, l'objectif étant de transposer d'une manière précise, l'ensemble des mesures, pour cela on utilisera des instruments rudimentaires :

- Un mètre ruban, (Figure 12)
- Un télémètre laser (Figure 13), outil qui permet à une personne seule de procéder à un relevé

Le processus du relevé compte les trois phases classiques : esquisser, mesurer, dessiner



Figure 14 : Double mètre ruban métallique



Figure 15 : Télémètre laser

A.3.2. L'outil de modélisation :

Pour ce qui en est de la modélisation, notre choix s'est porté sur un logiciel de modélisation destiné aux architectes et facilement accessible aux étudiants qui permet de modéliser en 3D et obtenir un rendu contextualisé proche de la réalité.

Notre choix s'est porté sur ArchiCAD, logiciel qui crée automatiquement des visuels 3D à partir des différents dessins 2D réalisées, et au quel est intégré une bibliothèque nous permettant d'aménager facilement les espaces et d'y ajouter du mobilier, étant aussi un outil collaboratif l'export vers une autre famille de logiciel sera facilité avec comme but de réaliser des rendus d'images stéréoscopiques.

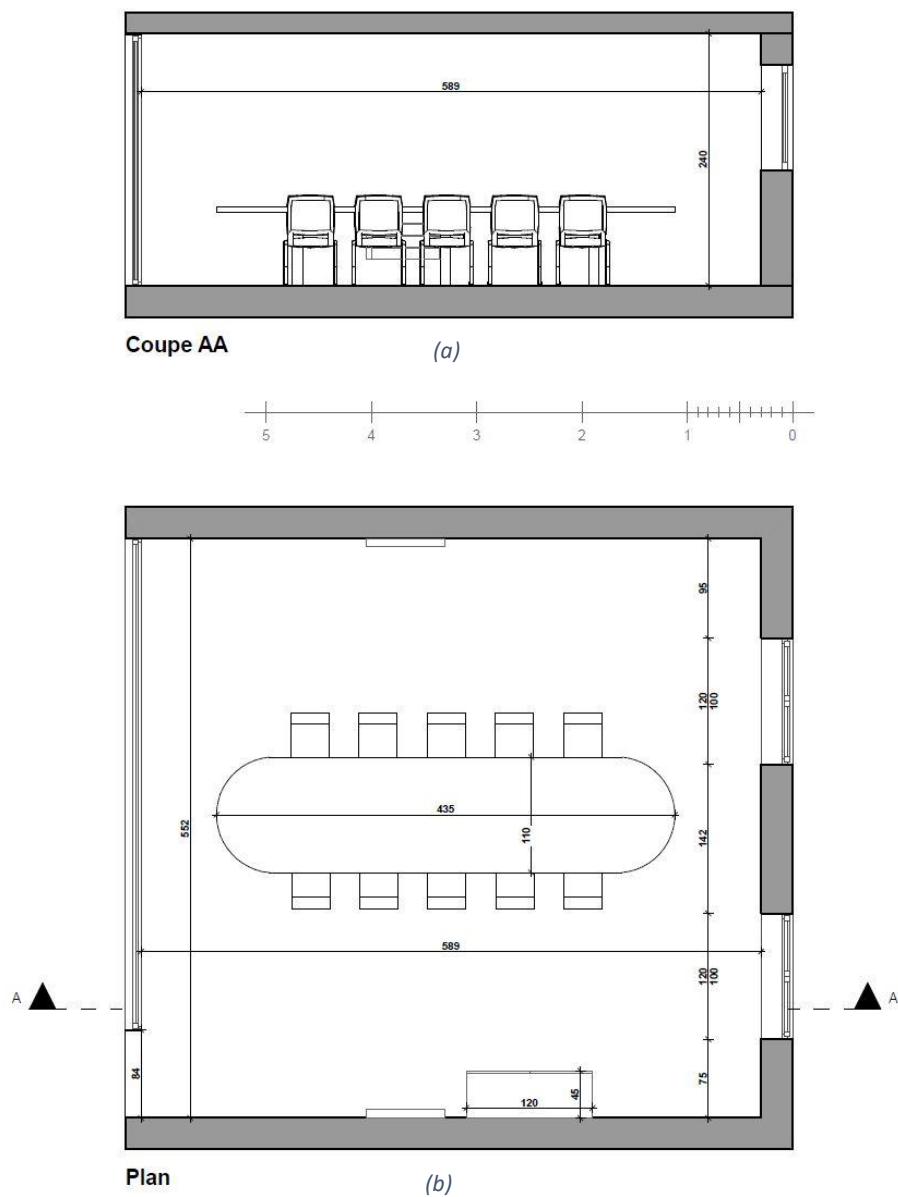


Figure 16 : Dessins générés depuis ArchiCAD (a) coupe (b) plan "Experience 1" (Source auteur)

A.3.3. L'outil de rendu

Compte tenu de l'essor de la technologie VR dans le domaine de l'architecture et du bâtiment, il n'est pas surprenant qu'un grand nombre d'acteurs des logiciels d'architecture se précipitent pour développer des applications et programmes qu'ils espèrent devenir l'accompagnement standard pour les différents appareils de visualisation, ayant une bonne maîtrise du plug-in de rendu V-RAY intégré pour 3DS MAX (de la famille Autodesk) notre choix s'est porté pour cet outil utilisé largement en école d'architecture et facilement accessible



Figure 17 : Rendu du model 3D experience 1 (Source auteur)

A.3.4. L'outil de visualisation :

La VR peut se pratiquer sur différents dispositifs matériels provoquant plusieurs degrés d'immersion : les écrans de PC, de tablettes, de smartphones, les écrans projetés (salles immersives ou cave), les écrans multiples avec simulateur matériel, les visiocasques avec ou sans simulateur matériel. Le dispositif étant un élément essentiel de l'immersion.

Le dispositif pris comme référence dans l'élaboration de notre expérience sera un « visiocasque » étant un dispositif relativement abordable, avec des prix allant de 15 à 800 euros on estime que le temps où le casque de réalité virtuelle devient un équipement de bureau standard dans les cabinets d'architecture et école n'est peut-être pas si lointain que ça.

On privilégiera aussi l'exploration d'une image stéréoscopique, cette méthode offre moins de libertés mais à l'avantage de cloisonner l'expérience utilisateur dans une limite bien définie : « Le sujet ne pourra voir que ce que nous voulons bien qu'il voit »

A.4. Sélection du visiocasque :

Pour des questions pratiques de mobilité et de prix, notre choix s'est porté pour un casque VR autonome (également appelé casque VR tout-en-un ou casque VR sans fil) qui ne requiert ni PC, ni smartphone. Ce type de visiocasque, rendu populaire grâce à Oculus, ces casque VR autonome embarque tous les composants nécessaire au fonctionnement : processeur, batterie, et présente donc l'avantage d'être portable, et ne requiert pas d'être branché à un ordinateur pour fonctionner, de plus avec ces casques plus besoin de disposer de capteurs externes dans la pièce comme c'est le cas pour les visiocasque pour PC, une technologie de tracking 6Dof Oculus Insight permet aux casques de suivre les mouvements et la position de l'utilisateur grâce à des caméras embarquées en façade.

Les espaces réels de référence dans cette expérience seront :

- Un espace de travail (salle de réunion)
- Un séjour.

Les formes des deux espaces seront respectivement carrées et rectangulaires, des relevés de ces espaces puis leur modélisation nous permettra de réaliser les modèles 3D puis les rendus des deux espaces virtuels. Ce dernier est issu d'une modélisation sur outils et logiciels décrit plus haut.

Les deux espaces sont de formes simples afin de faciliter l'appréciation des trois (03) dimensions, les couleurs des murs, cloisons et plafonds seront neutre, soit de couleur blanche afin d'éviter tout effet d'illusion optique.

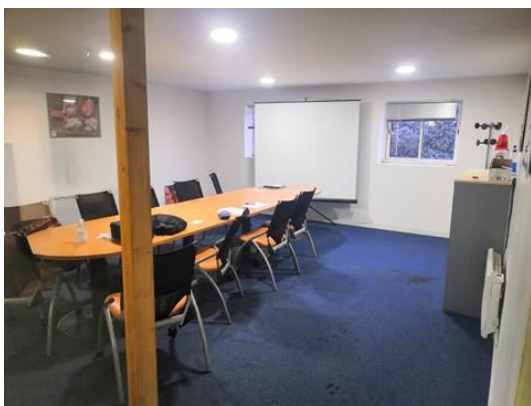
L'Oculus Quest pèse 470 grammes, et est pourvu d'un écran Dual Oled offrant une définition de 1440 x 1600 par œil, avec un taux de rafraichissement de 72 Hz. Son champ de vision est d'environ 100 degrés, une technologie de tracking 6Dof Oculus Insight permet aux casques de suivre les mouvements et la position de l'utilisateur grâce à des caméras embarquées en façade.



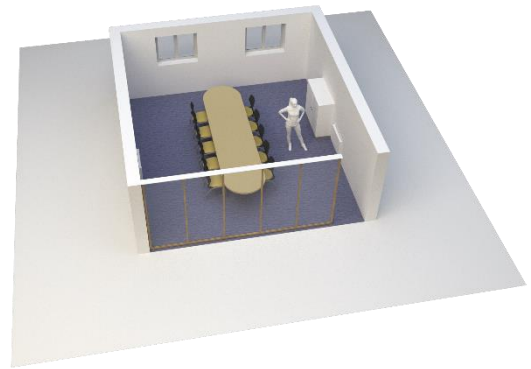
Figure 18 Oculus Quest

B. Expérience 1

La première expérience, étant celle d'une salle de réunion, cette dernière sera reproduite de façon la plus fidèle, avec son mobilier intérieur à taille réelle (Au centre une table, deux radiateurs et une armoire) l'ensemble reproduits avec les proportions et emplacement réel.



(a)



(b)

Figure 19 : Salle de reunion (a) Espace réel (b) Espace virtuel "expérience 1" (Source auteur)

Les couleurs et matériaux de la scène de rendu seront proches et le plus fidèle possible de la scène réelle, l'éclairage associé à l'environnement virtuel reproduit au plus proche et à la même distance que l'environnement réel, les deux espaces réel et virtuel sont présentées en Figure 20

Avant chaque expérience utilisateurs, on procède à l'équilibrage, réajustement et repositionnement de l'image virtuelle avec la scène réel afin d'avoir la bonne orientation, ce qui facilitera l'expérience utilisateur qui n'aura qu'à soulever et remettre le casque pour apprécier la différence.

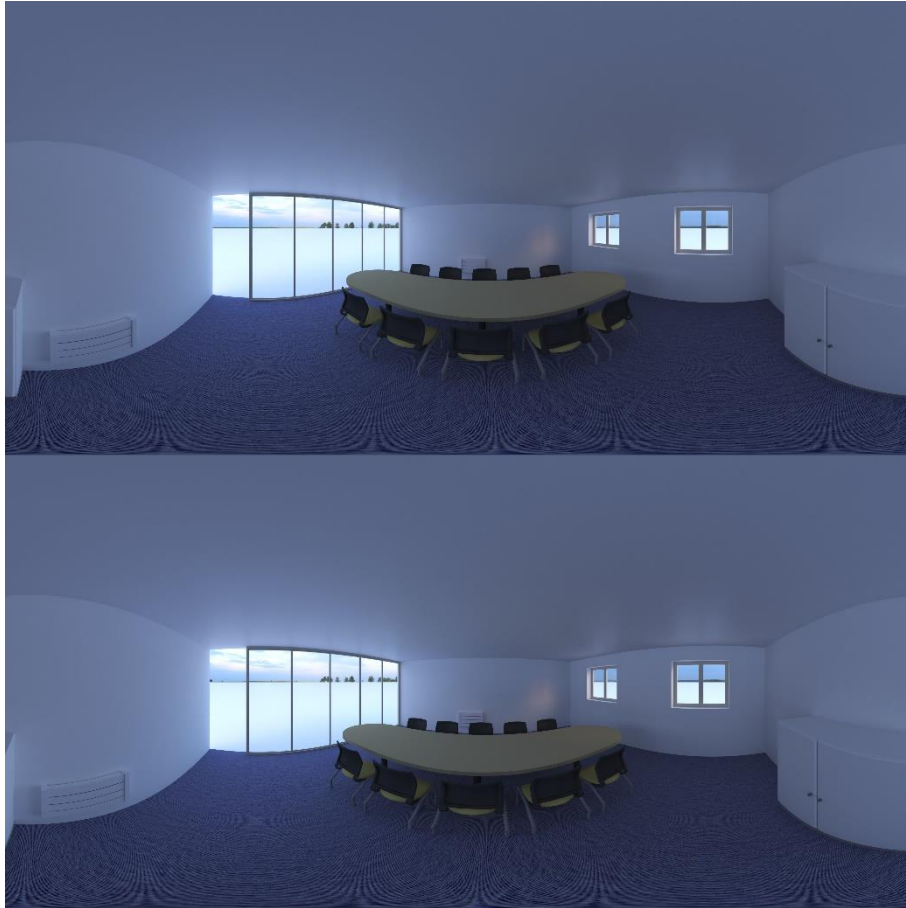
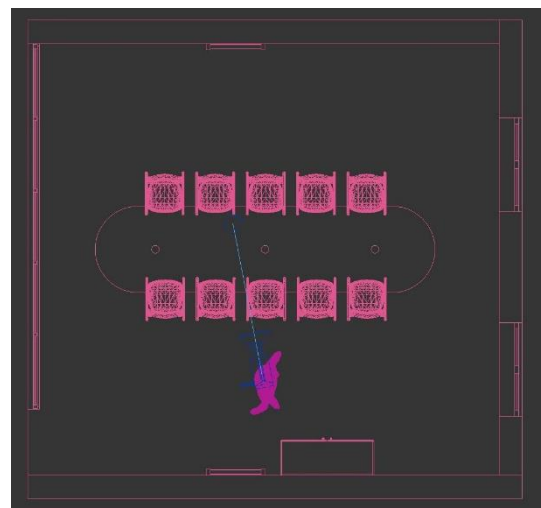


Figure 21 : image stereoscopique de la salle de reunion "experience 1" (Source auteur)



(a)



(b)

Figure 22 : Hauteur et emplacement de la camera (a) Coupe (b) plan "expérience 1" (Source auteur)

Pour cette expérience les sujets ont été placés de façon à avoir une position constante, dans l'espace réel et virtuel.



(a)



(b)

Figure 23: Hauteur et emplacement de la camera (a) Coupe (b) plan "expérience 1" (Source auteur)

B.1. Résultats

Les résultats de l'expérience qu'on décrit des (05) utilisateurs sont différenciés et classés dans un tableau selon un éventuel changement de taille sur l'espace virtuel, en d'autres termes, les proportions virtuelles sentées dans nos attentes être identiques au réel, chaque variation de taille (Largeur, Profondeur, Hauteur) de la pièce est signalé, on analyse ainsi la perception du virtuel comparativement au réel.

Les résultats obtenu de cette expérimentation sont classé dans le tableau suivant, selon trois paramètres

- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu plus grand que l'espace virtuel cela est représenté par le signe (+)
- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu identique à l'espace virtuel cela est représenté par le signe (=)
- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu plus petit que l'espace virtuel cela est représenté par le signe (-)

Le tableau 1 reprends les retours dominants des utilisateurs avec le pourcentage retenu par les utilisateurs.

Image A	Espace réel	Espace virtuel	%
Largeur	=	=	60 %
Profondeur	+	-	80 %
Hauteur	+	-	100 %

Tableau 2 : Tableau / questionnaire avec les retours dominant des sujets "expérience 1" (Source auteur)

Les résultats montrent des différences perçus entre l'espace réel comparativement à l'espace virtuel en profondeur et hauteur, et une égalité perceptive de la largeur.

Estimation de l'espace virtuel par rapport à l'espace réel :

Largeur : Egalité

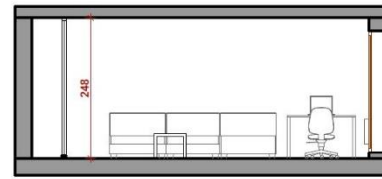
Profondeur : Sous-estimation

Hauteur : Sous-estimation

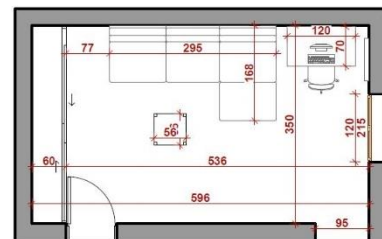
C. Expérience 2

Suite aux limites de la première expérience et le nombre réduit d'utilisateurs (05), une deuxième tentative avec la réalisation de plusieurs variations est réalisé. Aussi, les sujets seront choisis selon un facteur inclusif de taille, comprise entre 1m80 et 1m85, la hauteur du rendu étant fixe, cette donnée nous permettra de limiter les incohérences liée à la hauteur.

L'espace sera un petit séjour d'appartement de forme rectangulaire, ce dernier sera reproduit de la façon la plus fidèle avec les différents emplacements des ouvertures.



Coupe AA



Version A

Plan (b)

Figure 24 : Dessins générés depuis ArchiCAD (a) coupe (b) plan "Expérience 2" (Source auteur)

Plusieurs images seront calculées

- L'image A sera la plus fidèle possible à la scène réelle, dans ses proportions et couleurs, avec les pièces du mobilier intérieur les plus importantes et à taille réelle.



Figure 25 : Image A "Expérience 2" (Source auteur)

- L'image B sera fidèle dans ses proportions et matériaux à la scène réelle, mais sera vide soit sans mobilier, ainsi les utilisateurs n'auront pas d'autres repères que le volume de base.

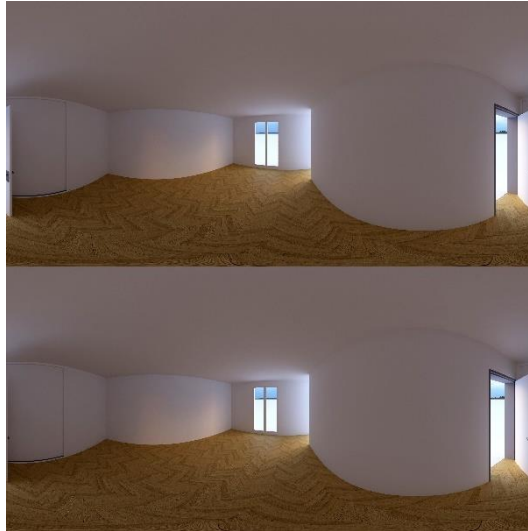


Figure 26 : Image B (Experience 2)

- Sans mobilier, volume vide, avec variation de la couleur du plafond (ton foncé) afin de créer un effet d'un volume moins haut.

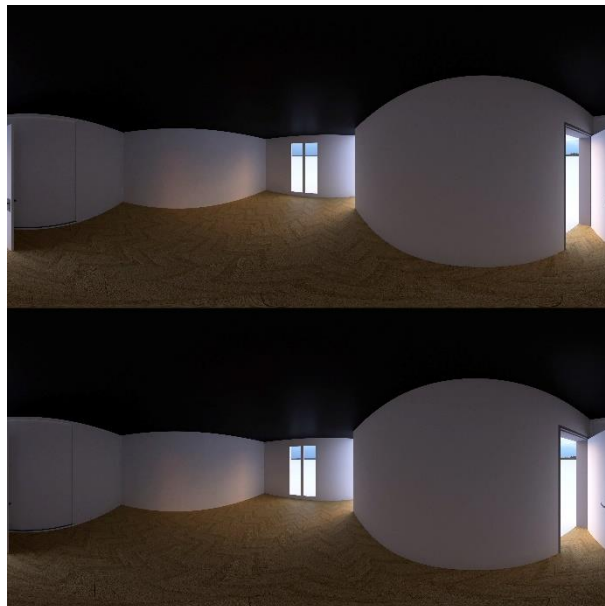


Figure 27 : Image C (Experience 2)

- Sans mobilier, volume vide, avec variation des couleurs des deux cloisons en largeur (ton foncé) afin de créer un effet d'un volume plus étroit.

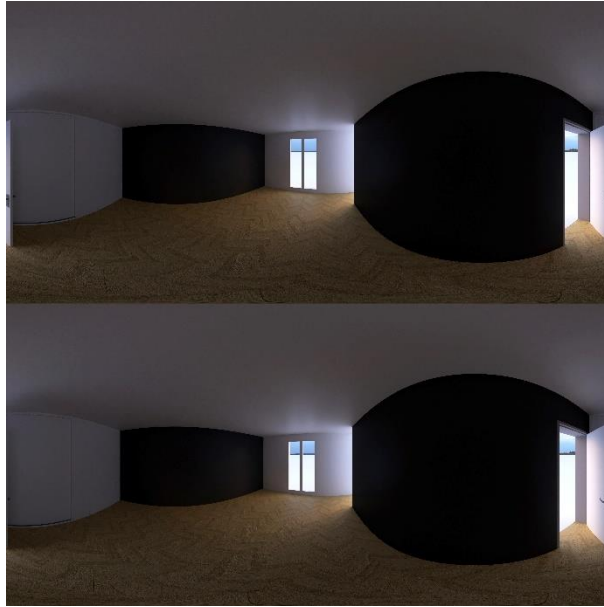


Figure 28 – Image D

Avant chaque expérience utilisateur, on procède à l'équilibrage, réajustement et repositionnement de l'image virtuelle avec la scène réel afin d'avoir la bonne orientation, ce qui facilitera l'expérience utilisateur qui n'aura qu'à soulever et remettre le casque pour apprécier la différence.



(a)



(b)

Figure 29 : (a) Utilisateur observant l'espace virtuel (b) l'utilisateur observant l'espace réel

C.1. Résultats

Les résultats de l'expérience qu'on décrit des (10) utilisateurs sont différenciés et classés dans des tableaux selon un éventuel changement de taille sur l'espace virtuel (Largeur, Profondeur, Hauteur) chaque changement de perception est signalé.

Les résultats obtenu de cette expérimentation sont classé dans les tableaux suivant, selon trois paramètres (identique à l'expérience numéro 1)

- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu plus grand que l'espace virtuel cela est représenté par le signe (+)
- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu identique à l'espace virtuel cela est représenté par le signe (=)
- Quand l'utilisateur désigne que l'espace réel est perçu plus petit que l'espace virtuel cela est représenté par le signe (-)

Image A	Espace réel	Espace virtuel	%
Largeur	=	=	80 %
Profondeur	+	-	90 %
Hauteur	=	=	80 %

Tableau 3 : Perception Figure 30 : Image A (experience 2)

Image B	Espace réel	Espace virtuel	%
Largeur	=	=	60 %
Profondeur	+	-	80 %
Hauteur	=	=	90 %

Tableau 4 : Perception Figure 31 : Image B (experience 2)

Image C	Espace réel	Espace virtuel	%
Largeur	=	=	60 %
Profondeur	+	-	80 %
Hauteur	+	-	60 %

Tableau 5 : Perception Figure 32 : Image C (Experience 2)

Image D	Espace réel	Espace virtuel	%
Largeur	=	=	60 %
Profondeur	+	-	60 %
Hauteur	=	=	100 %

Tableau 6 : Perception Figure 33 – Image D

Les résultats montrent des différences perçues entre l'espace réel comparativement à l'espace virtuel en profondeur, et une égalité perceptive de la largeur et de la hauteur

Estimation de l'espace virtuel par rapport à l'espace réel :

Largeur : Egalité

Profondeur : Sous-estimation

Hauteur : Egalité

3. Discussion et conclusion

Des résultats obtenus plus hauts dans l'expérience 1 et 2 et de leurs interprétations on peut émettre plusieurs hypothèses. La première consiste à relier les résultats obtenus notamment un ressenti de profondeur de notre scène 3D (salle de réunion et séjour) amoindri par rapport à l'espace réel. En effet l'utilisation de visio-casque comme on l'a défini plus haut dans le premier chapitre comporte des similarités avec la vision réelle mais n'en est pas identique.

C'est dû à un problème de qualité visuelle du visio-casque lui-même qui présente de grandes difficultés à l'utilisateur pour observer des images en stéréoscopie trop proches des yeux. Le premier défis est que le visio-casque nécessite d'être paramétré en termes de géométrie et d'optique pour être parfaitement aligné avec ceux de l'utilisateur. Par exemple, la DIO (Distance Intra Oculaire) est généralement fixe sur le visio-casque comme sur l'image stéréoscopique affichée Or, la DIO varie d'un utilisateur à l'autre. Les constructeurs étant obligé d'utiliser une valeur moyenne de DIO de 65mm en général. De ce fait la vision stéréoscopique de la scène 3D n'est pas celle vécu en réalité compte tenue que c'est elle qui donne le ressenti de profondeur de la pièce.

Une autre hypothèse liée aux limites techniques du visio-casque et qui a été soulignée plus haut est le problème d'incohérence de nature sensorielle. Il s'agit d'une gêne oculomotrice de la vision liée au phénomène d'accommodation-(con)vergence. Comme l'a souligné Fuchs [Fuc13] les images virtuelles en stéréoscopie doivent donner une convergence correcte aux yeux en fonction de la profondeur de l'objet observé. Or, sur un visio-casque l'accommodation et la convergence ne sont pas en relation de la même manière que dans la réalité. Si les yeux essaient de converger vers l'objet observé en RV (dans notre cas le mur du fond de la pièce), ils ne s'accommodent que sur la distance entre les yeux et les écrans situés à quelques centimètres et ceux à une distance fixe. Dans la réalité l'accommodation varie selon la profondeur de l'objet fixée. Ceci perturbe le cerveau et peut fausser l'impression de relief ou de profondeur de l'utilisateur d'où les résultats obtenus.

Aux deux hypothèses citées précédemment on peut rajouter le fait que souvent plusieurs sources d'erreurs existent dans les modèles optiques du visio-casques. Ces mêmes modèles optiques qui permettent notamment de masquer la visibilité des trames de pixel dû à une grande proximité des écrans vont agir des fois comme des agrandisseurs avec des défauts optiques. Ces derniers créer des aberrations sphériques, astigmatismes, distorsions, etc.) qui peuvent expliquer la différence en termes de restitution d'informations spatiales perçus par les utilisateurs en RV et celle perçus dans la réalité.

L'explication n'est pas seulement liée à des caractéristiques du visio-casques comme ça l'est dans les hypothèses citées précédemment. On peut aussi se tourner vers les algorithmes qui calculs les images à afficher dans le visio-casques et qui font la simulation de la stéréoscopie

pour l'utilisateur. En effet, Ces images doivent suivre des règles de perspective et de géométrie avec des dimensions relatives qui simules les calculs faits par le cerveau humain. Ces mêmes algorithmes peuvent alors ne pas être suffisamment aboutis pour miroiter le fonctionnement du cerveau humain dans une visualisation réelle.

Enfin, une dernière hypothèse qui peut traduire nos résultats concerne des aspects psychologiques liées directement à l'expérience de RV que subit l'utilisateur par visio-casque. Une mauvaise perception spatiale de nos deux scènes 3D peut être lié à des problèmes d'inconfort psychologiques et d'isolement que procure de type d'interface visuelle. L'utilisation du visio-casque, même si elle a grandement évolué par rapport à ces débuts dans les années 1970, reste du moins « intrusive » dans le sens ou le casque a une certaine masse et qu'il comprend des attaches (ou élastiques) pour le fixer sur la tête avec même un éventuel déplacement du centre de gravité de la tête.

Aujourd'hui l'analyse de l'interfaçage entre l'homme et le monde virtuel nécessite de faire appel à des savoirs pluridisciplinaires. D'autres travaux de recherche sont encore dans le domaine avec des aspects ergonomiques, techniques et psychologique pas encore traités en profondeur au vu de la rapidité du développement technologique des visiocasques ces dernières décennies.

L'arrivée prochaine de nouveaux modèles de visio-casques peut répondre à certains problèmes soulevés dans notre travail de recherche. On peut ainsi citer le StarVR de la société Starbreeze qui offre le plus large champ de vision horizontal sur marché (210°) et un recouvrement de 90°. Celui-ci est équipé de deux écrans de 5120 x 1440 avec une valeur de 17 ppp (pixel par degrés) et surtout une capacité de suivre les yeux (tracking) ce qui peut régler le problème de vision d'accommodation-(con)vergence cités plus haut.

Bibliographie

- [AFT03] Bruno Arnaldi, Philippe Fuchs et Jacques Tisseau : Le traité de la réalité virtuelle, chapitre 1, page 8. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [BC93] Grigore Burdea et Philippe Coiffet : La réalité virtuelle. Hermès, 1993
- [BFu19] BERNARD, Cécile Isabelle, et Philippe FUCHS. « Influence des environnements virtuels ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 juin 2019. 2019
- [Bou09] Bouvier, Patrice. « La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur ». Phd thesis, Université Paris-Est, 2009.
- [Bou16] BOUVILLE, Rozenn. « Environnements virtuels 3D - Typologie et interopérabilité ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2016.
- [Cor07] CORSI, Patrick. « Développement des technologies de réalité virtuelle ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2007.
- [Chiu97] Chan, Chiu-Shui. « Virtual Reality in Architectural Design », 1997.
- [Del03] DELINGETTE, Hervé. « Techniques de la réalité virtuelle en médecine ». Text. Ref : TIP597WEB - « Technologies biomédicales ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2003.
- [Ell91] Stephen R. Ellis : Nature and origins of virtual environments : a bibliographical essay. Computing Systems in Engineering, 2(4):321–347, 1991.
- [FM03] Philippe Fuchs et Guillaume Moreau : Le traité de la réalité virtuelle. Presse de l'Ecole des Mines, seconde édition, 2003.
- [FM06] FUCHS (Ph.) et MOREAU (G.). – Le traité de la réalité virtuelle 3^e édition, 5 volumes, Les Presses de l'École des Mines de Paris, 324 p., ISBN 2-911762-62-2, 63-0, 64-9 et 65-7, fév. 2006.
- [FMP14] FUCHS, Philippe, Guillaume MOREAU, et Alexis PALJIC. « Réalité virtuelle - Concepts et outils ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2014. 2014.
- [Fon20] Fontaine, Séverine. « La réalité virtuelle au service des hôpitaux ». Techniques de l'Ingénieur (blog). 4 mars 2020.
- [Fuc03] FUCHS, Philippe.: Introduction à la réalité virtuelle. In Le traité de la réalité virtuelle, volume 1, chapitre 1. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [Fuc13] FUCHS, Philippe. « Interfaces visuelles pour la réalité virtuelle ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2013. 2013.
- [Fuc16] FUCHS, Philippe : – Chapitre 7, « Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo ». Presses des Mines, 244 pages, ISBN: 978-2-35671-396-4 (2016).

- [Fuc19] FUCHS, Philippe. « Les véritables usages de la réalité virtuelle dans l'industrie ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2019. 2019..
- [Hei62] Morton L. Heilig : Sensorama Stimulator, 1962. United States Patent and Trade Office, Virginia, USA, US-3,050,870.
- [KHS89] Kevin. Kelly, Adam Heilbrun et Barbara Stacks : Virtual reality : an interview with Jaron Lanier. Whole Earth Review, 64:108–120, 1989.
- [Kli19] KLINGER, Evelyne. « La réalité virtuelle au service de l'autonomie des personnes ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 juin 2019.
- [Mon17] Monflier, Frédéric. « La réalité virtuelle cimentera le bâtiment du futur, fondé sur la maquette numérique ». Techniques de l'Ingénieur (blog), 29 novembre 2017.
- [Mon20] Monflier, Frédéric. « Comment la réalité virtuelle diminue le stress des greffés du poumon ? » Techniques de l'Ingénieur (blog). 2 janvier 2020.
- [RFu06] RICHIR, Simon, et Philippe FUCHS. « LA MÉTHODE I²I : « Interaction et Immersion pour l'Innovation » ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 août 2006.
- [Rhe93] Howard Rheingold : La réalité virtuelle : quand l'illusion a toutes les apparences de la réalité. Dunod, 1993.
- [RPW97] Randy Pausch, Dennis Proffitt, and George Williams. Quantifying Immersion in Virtual Reality. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97, pages 13–18, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Sla03] Mel Slater. A note on presence terminology. Presence connect, 3(3) :1{5, 2003.
- [Sut65] I.E. Sutherland : The ultimate display. In Proceedings of the IFIP Congress, volume 2, pages 506–508, 1965.
- [TIn10] La rédaction, Techniques de l'Ingénieur. « « La réalité virtuelle se démocratise » ». Techniques de l'Ingénieur (blog). 11 janvier 2010.
- [TIn14] La rédaction, Techniques de l'Ingénieur. « Réalité virtuelle : effet de mode ou révolution ? » Techniques de l'Ingénieur (blog). 17 décembre 2014.
- [Tin19] La rédaction, Techniques de l'Ingénieur. « La réalité virtuelle au service de la formation ». Techniques de l'Ingénieur (blog). 6 mars 2019.
- [TBM06] Thomas A. Stourgen, Benoit G. Bardy, and Bruno Mantel. A ordances in the design of enactive systems. Virtual Reality, 10(1) :4{10, 2006.
- [Tho19] Thouverez, Pierre. « La réalité virtuelle décolle chez les industriels ». Techniques de l'Ingénieur (blog). 22 novembre 2019.
- [VC110] VAUCHER, Emmanuel, et Emmanuel CLAVAUD. « Utilisation d'outils de réalité virtuelle dans les formations de la sécurité civile ». Text. Ref : TIP383WEB - « Le traitement du signal et ses applications ». Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur, 10 février 2010.
- [Zel92] David Zeltzer : Autonomy, interaction, and presence. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, 1(1):127–132, 1992.

- [Das85] Da Silva, J. A. « Scales for Perceived Egocentric Distance in a Large Open Field: Comparison of Three Psychophysical Methods ». *The American Journal of Psychology* 98, n° 1 (1985): 119-44.
- [Fol77] Foley, J. M. « Effect of Distance Information and Range on Two Indices of Visually Perceived Distance ». *Perception* 6, n° 4 (1977): 449-60. <https://doi.org/10.1068/p060449>.
- [GiB54] Gibson, E. J., et R. Bergman. « The Effect of Training on Absolute Estimation of Distance over the Ground ». *Journal of Experimental Psychology* 48, n° 6 (décembre 1954): 473-82. <https://doi.org/10.1037/h0055007>.
- [LDF92] Loomis, J. M., J. A. Da Silva, N. Fujita, et S. S. Fukusima. « Visual Space Perception and Visually Directed Action ». *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 18, n° 4 (novembre 1992): 906-21. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.18.4.906>.
- [LKP98] Loomis J. M., Roberta L. Klatzky, John W. Philbeck, et Reginald G. Golledge. « Assessing Auditory Distance Perception Using Perceptually Directed Action ». *Perception & Psychophysics* 60, n° 6 (1 septembre 1998): 966-80. <https://doi.org/10.3758/BF03211932>.
- [RAT90] Rieser, J. J., D. H. Ashmead, C. R. Talor, et G. A. Youngquist. « Visual Perception and the Guidance of Locomotion without Vision to Previously Seen Targets ». *Perception* 19, n° 5 (1990): 675-89. <https://doi.org/10.1068/p190675>.
- [SOH98] Sinai, M. J., T. L. Ooi, et Z. J. He. « Terrain Influences the Accurate Judgement of Distance ». *Nature* 395, n° 6701 (1 octobre 1998): 497-500. <https://doi.org/10.1038/26747>.
- [Elo87] Eby, David W., et Jack M. Loomis. « A Study of Visually Directed Throwing in the Presence of Multiple Distance Cues ». *Perception & Psychophysics* 41, n° 4 (1 juillet 1987): 308-12. <https://doi.org/10.3758/BF03208231>.
- [OWH01] Ooi, T. L., B. Wu, et Z. J. He. « Distance Determined by the Angular Declination below the Horizon ». *Nature* 414, n° 6860 (8 novembre 2001): 197-200. <https://doi.org/10.1038/35102562>.
- [TWG04] Thompson, William B., Peter Willemsen, Amy A. Gooch, Sarah H. Creem-Regehr, Jack M. Loomis, et Andrew C. Beall. « Does the Quality of the Computer Graphics Matter When Judging Distances in Visually Immersive Environments? » *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 13, n° 5 (octobre 2004): 560-71. <https://doi.org/10.1162/1054746042545292>.
- [KLo04] Knapp, Joshua M., et Jack M. Loomis. « Limited Field of View of Head-Mounted Displays Is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 13, n° 5 (octobre 2004): 572-77. <https://doi.org/10.1162/1054746042545238>.
- [CWG05] Creem-Regehr, Sarah H, Peter Willemsen, Amy A Gooch, et William B Thompson. « The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception: Implications for Real and Virtual Indoor Environments ». *Perception* 34, n° 2 (1 février 2005): 191-204. <https://doi.org/10.1068/p5144>.
- [WGT08] Willemsen, Peter, Amy A. Gooch, William B. Thompson, et Sarah H. Creem-Regehr. « Effects of Stereo Viewing Conditions on Distance Perception in Virtual Environments ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 17, n° 1 (1 février 2008): 91-101. <https://doi.org/10.1162/pres.17.1.91>.

[WCC09] Willemsen, Peter, Mark B. Colton, Sarah H. Creem-Regehr, et William B. Thompson. « The effects of head-mounted display mechanical properties and field of view on distance judgments in virtual environments ». *ACM Transactions on Applied Perception* 6, n° 2 (10 mars 2009): 8:1-8:14. <https://doi.org/10.1145/1498700.1498702>.

[KWS09] Kunz, Benjamin R., Leah Wouters, Daniel Smith, William B. Thompson, et Sarah H. Creem-Regehr. « Revisiting the Effect of Quality of Graphics on Distance Judgments in Virtual Environments: A Comparison of Verbal Reports and Blind Walking ». *Attention, Perception, & Psychophysics* 71, n° 6 (1 août 2009): 1284-93. <https://doi.org/10.3758/APP.71.6.1284>.

[MCT06] Mohler, Betty, Sarah Creem-Regehr, et William Thompson. « The influence of feedback on egocentric distance judgments in real and virtual environments », 9-14, 2006. <https://doi.org/10.1145/1140491.1140493>.

[RWa05] Richardson, Adam R., et David Waller. « The Effect of Feedback Training on Distance Estimation in Virtual Environments ». *Applied Cognitive Psychology* 19, n° 8 (2005): 1089-1108. <https://doi.org/10.1002/acp.1140>.

[RWa07] Richardson, Adam R., et David Waller. « Interaction With an Immersive Virtual Environment Corrects Users' Distance Estimates ». *Human Factors* 49, n° 3 (1 juin 2007): 507-17. <https://doi.org/10.1518/001872007X200139>.

[RWa08] Waller, David, et Adam R. Richardson. « Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: Effects of task and available sensory information ». *Journal of Experimental Psychology: Applied* 14, n° 1 (mars 2008): 61-72. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.14.1.61>.

[KDS13] Kelly, Jonathan W., Lisa S. Donaldson, Lori A. Sjolund, et Jacob B. Freiberg. « More than Just Perception—Action Recalibration: Walking through a Virtual Environment Causes Rescaling of Perceived Space ». *Attention, Perception, & Psychophysics* 75, n° 7 (1 octobre 2013): 1473-85. <https://doi.org/10.3758/s13414-013-0503-4>.

[KCT15] Kunz, Benjamin R, Sarah H Creem-Regehr, et William B Thompson. « Testing the Mechanisms Underlying Improved Distance Judgments in Virtual Environments ». *Perception* 44, n° 4 (1 avril 2015): 446-53. <https://doi.org/10.1068/p7929>.

[SKC17] Siegel, Zachary D., Jonathan W. Kelly, et Lucia A. Cherep. « Rescaling of perceived space transfers across virtual environments ». *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Celebrating 125 Years at APA, 43, n° 10 (octobre 2017): 1805-14. <https://doi.org/10.1037/xhp0000401>.

[MMS17] Milovanovic, Julie, Guillaume Moreau, Daniel Siret, et Francis Miguët. « Virtual and Augmented Reality in Architectural Design and Education ». In *17th International Conference, CAAD Futures 2017*. Istanbul, Turkey: Gülen Çağdaş, Mine Özkar, Leman F. Gül and Ethem Gürer, 2017. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01586746>.

[DMO20] Davila Delgado, Juan Manuel, Lukumon Oyedele, Peter Demian, et Thomas Beach. « A Research Agenda for Augmented and Virtual Reality in Architecture, Engineering and Construction ». *Advanced Engineering Informatics* 45 (1 août 2020): 101122.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101122>.

ArchiGrind. « 8 Logiciels et Apps VR & AR pour l'Architecture », 15 octobre 2020.
<https://archigrind.fr/logiciels-apps-vr-ar-architecture/>.

ArchiGrind. « 5 Casques de Réalité Virtuelle Pour Architectes », 21 février 2020.
<https://archigrind.fr/casques-de-realite-virtuelle-architectes/>.

L, Bastien. « Oculus Rift S vs Oculus Quest : quel nouveau casque VR choisir ? » Réalité-Virtuelle.com (blog), 22 mars 2019. <https://www.realite-virtuelle.com/oculus-rift-s-vs-quest/>.

« Oculus Quest 2: notre casque VR tout-en-un le plus perfectionné | Oculus .
<https://www.oculus.com/quest-2/>.

ANNEXES

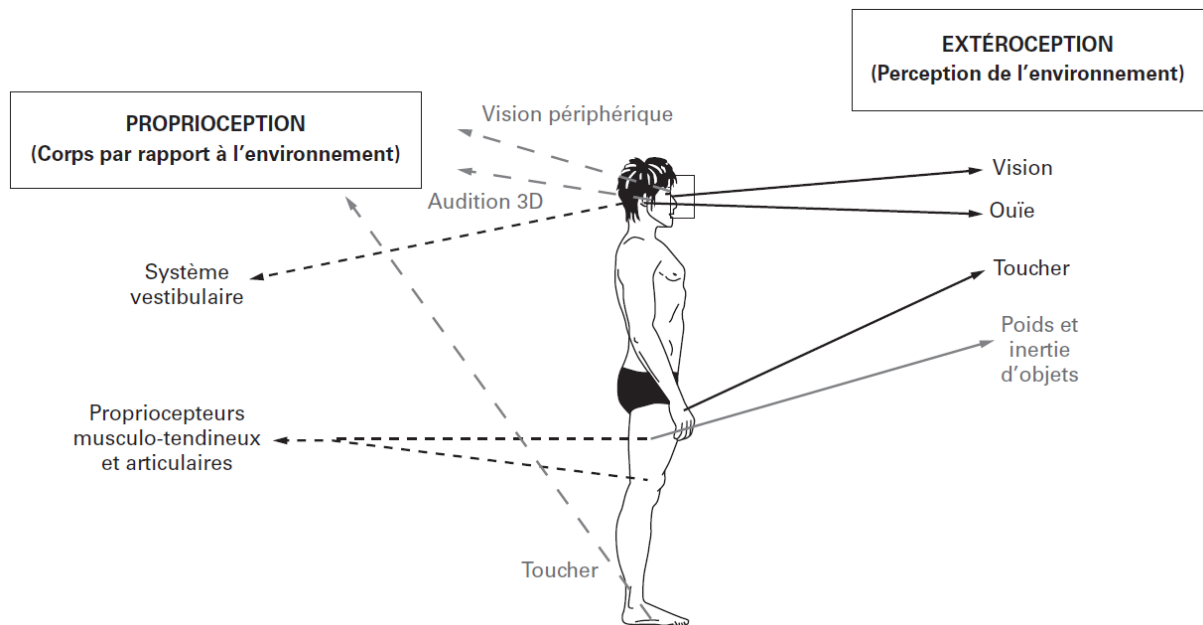


Figure 35 Schéma simplifié de l'extéroception et de la proprioception. En gris, des récepteurs proprioceptifs exploités pour l'extéroception et inversement

Source : [Fuc19]

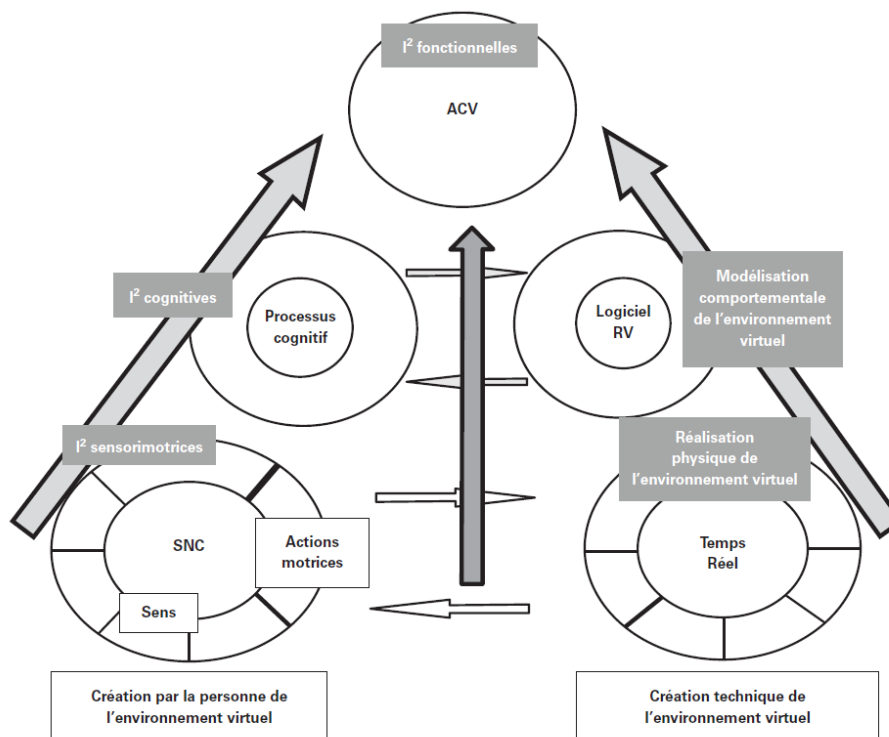


Figure 34 Schéma général à trois niveaux d'immersion et d'interaction

Source : [Fuc19]

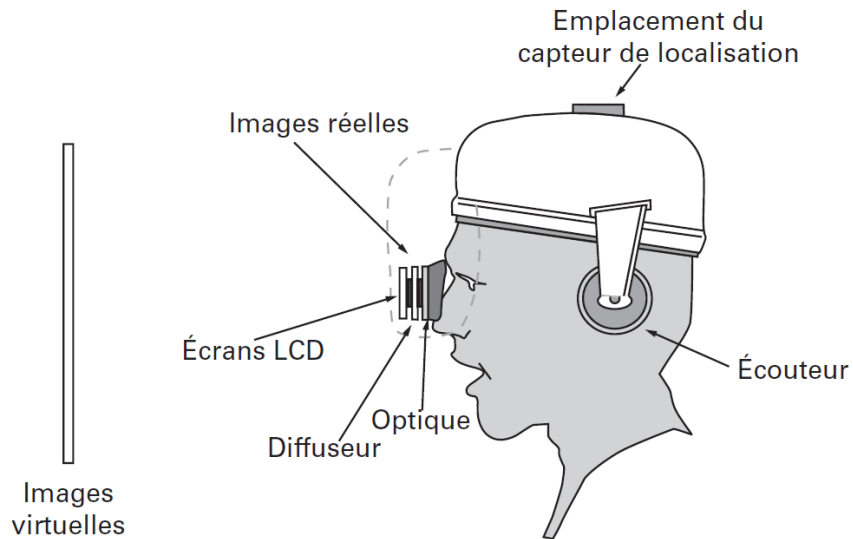


Figure 37 Schéma de principe d'un visio-casque à écrans

Source : [Fuc13]

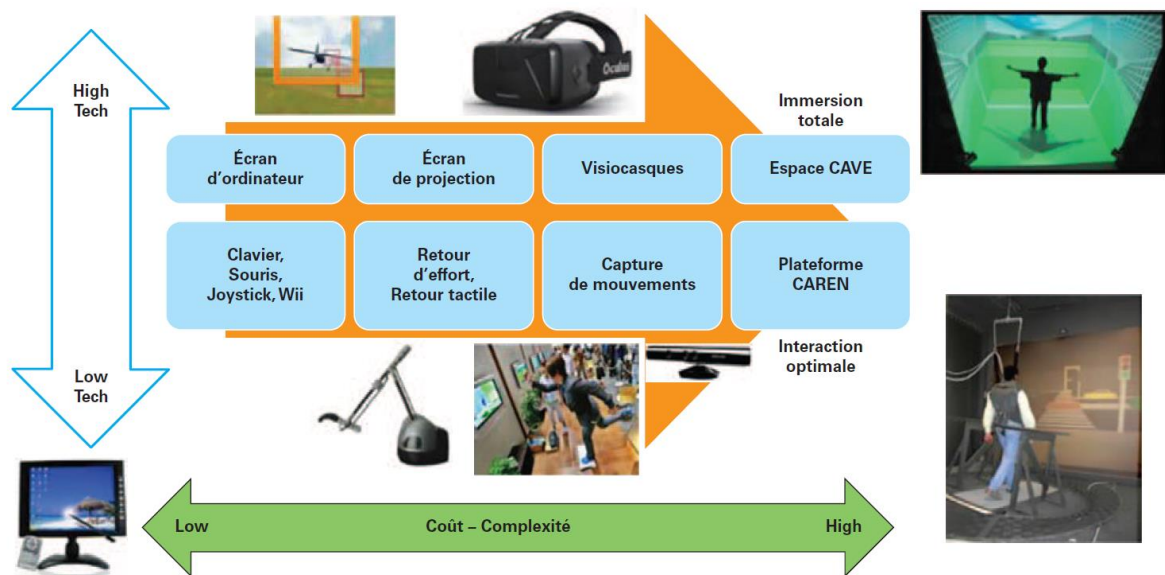


Figure 36 Immersion et interaction - Le continuum de la Réalité Virtuelle

Source : [Kli19]

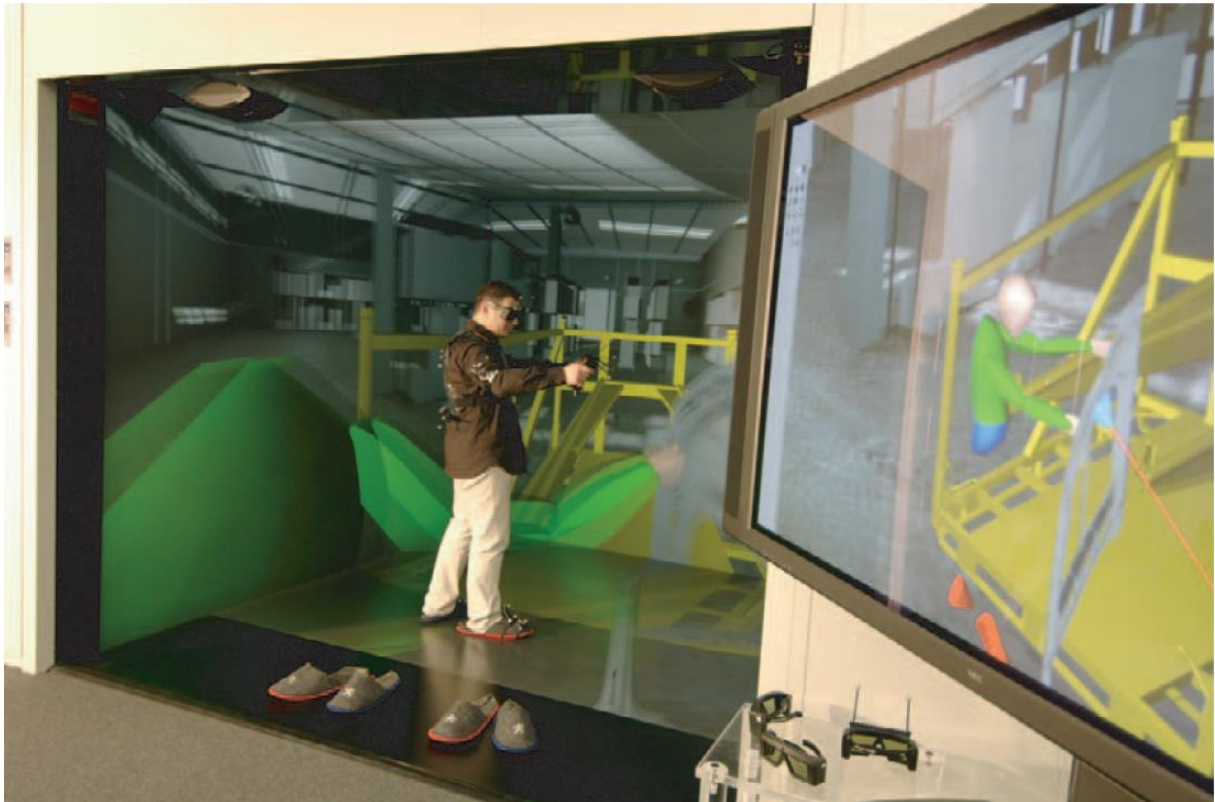


Figure 39 Simulation d'un poste de travail en usine dans un CAVE (Copyright Groupe PSA)

Source : [Fuc19]



Figure 38 STARVR ONE

Source : <https://www.starvr.com/product/>

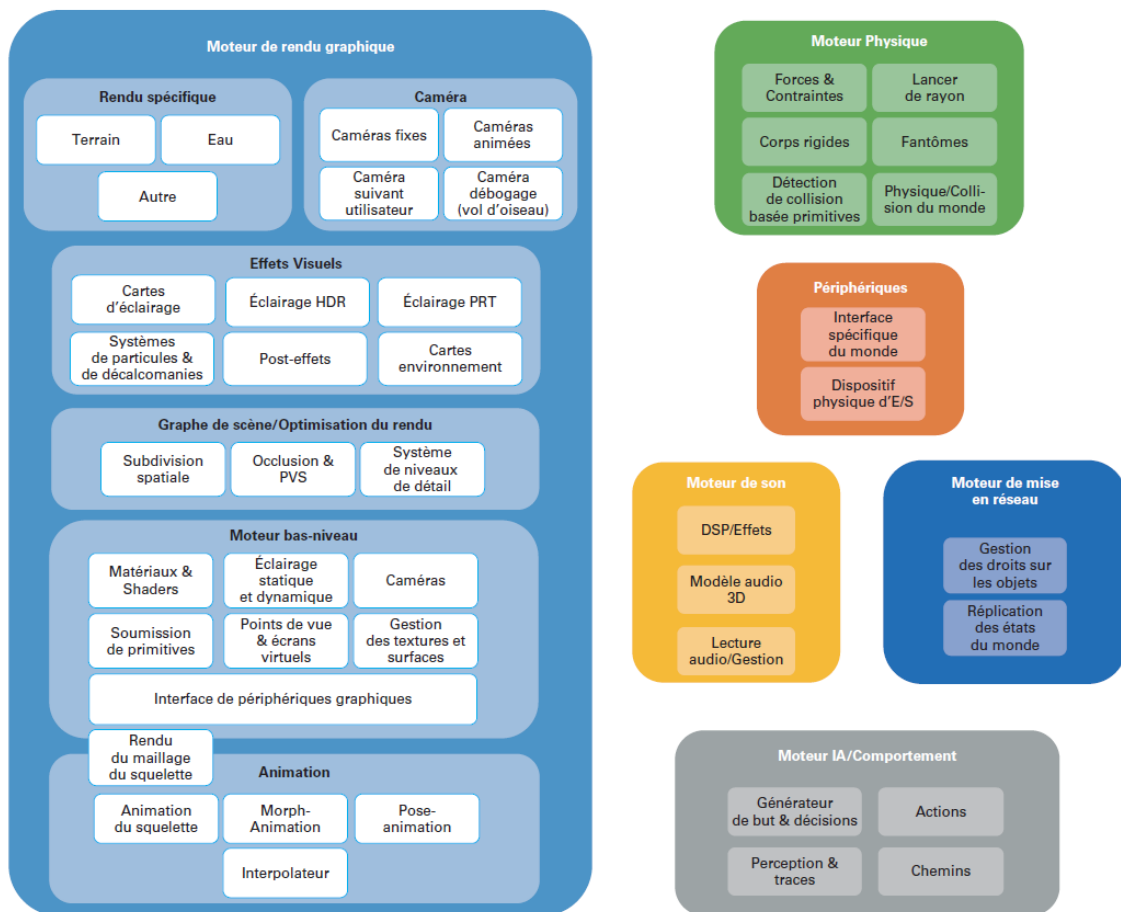


Figure 41 Architecture standard des environnements virtuels 3D

Source [Bou16]

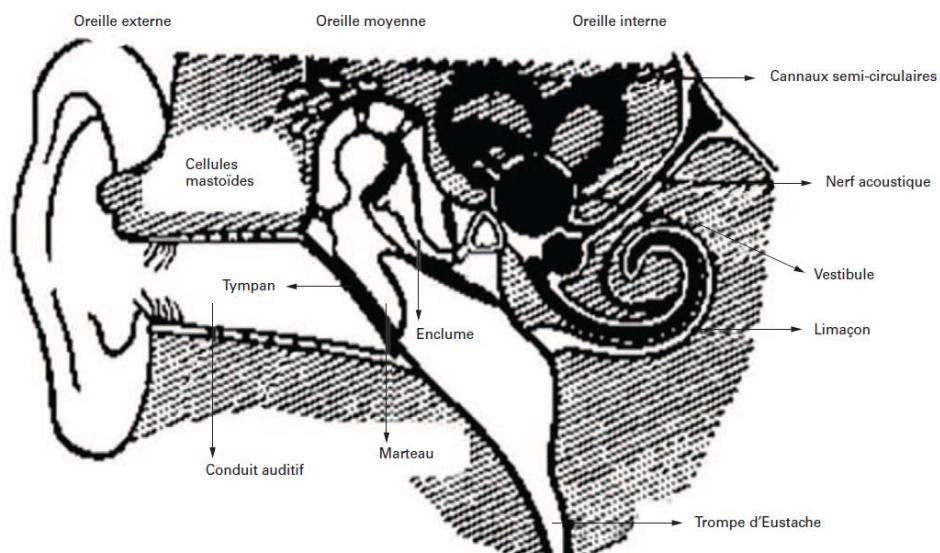


Figure 40 Les récepteurs du système vestibulaire dans l'oreille interne

Source [BFu19]

Notations

RV	Réalité Virtuelle
EV	Environnement Virtuel
ER	Environnement Réel
CAVE	Cave Automatic Virtuel Environment
RVO	Reflexe vestibulo-oculaire