

# **Effet de la distance et de la nature de la scène visuelle dans une tâche d'évaluation des affordances en réalité virtuelle**

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de  
Master of Science en sciences du sport  
Option enseignement

déposé par

**Chiara Nicoletta Morotti**

à

l'Université de Fribourg, Suisse  
Faculté des sciences et de médecine  
Section Médecine  
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la  
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent

Dr. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller

Dr. Jean-Luc Bloechle

Fribourg, Septembre 2022

## **Remerciements**

Je tiens à dédier cet espace à ceux qui, avec dévouement et patience, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements particuliers vont au Professeur Jean-Pierre Bresciani qui m'a suivi, avec son infinie disponibilité, dans toutes les étapes de la réalisation du mémoire et m'a toujours fourni des conseils et des points de vue précieux. Je tiens également à remercier le Dr Jean-Luc Bloechle car grâce à son travail de conception et de programmation, j'ai pu réaliser la partie pratique sans aucun problème.

Merci à tous les participants qui se sont rendus disponibles et m'ont accordé leur temps pour cette étude.

Merci à tous mes collègues de cours qui m'ont toujours encouragé depuis le début de ma carrière universitaire. Je tiens également à remercier l'Université de Fribourg qui, durant mes années d'études, a su me transmettre de nombreux enseignements qui m'ont permis de m'épanouir tant sur le plan professionnel que personnel.

Enfin, je tiens à remercier ma mère, dont la patience et l'affection m'ont toujours poussé à faire de mon mieux.

## **Résumé**

### **Introduction**

La technologie de la réalité virtuelle fait de plus en plus partie de la vie humaine et, grâce aux grands progrès réalisés ces dernières années, elle est utilisée dans de nombreux domaines à des fins telles que la thérapie, la formation, etc. Il est toutefois apparu que la perception et la vision dans ce type de monde ne sont pas tout à fait les mêmes que dans le monde réel, et la question se pose de savoir comment cela affecte les performances. Plusieurs études ont tenté d'examiner précisément ces questions, mais il n'existe pas encore de réponses claires et précises à ce sujet.

### **Objectif**

L'objectif de ce travail est d'étudier si la distance et la nature de l'indice visuel exercent une influence significative sur la performance d'une tâche d'évaluation d'affordance dans un environnement virtuel.

### **Méthode**

Un groupe d'adultes en bonne santé a été testé dans deux environnements virtuels différents, à deux distances différentes. Des mesures ont été prises à l'aide d'un casque de réalité virtuelle pour observer la réalisation d'une tâche d'évaluation de l'affordance dans un environnement virtuel. Les sujets ont été testés sur leur capacité à déterminer s'ils pouvaient passer, ou non, à travers des ouvertures.

### **Résultats**

Les résultats de cette recherche ont été partiellement significatifs. En général, une différence significative a pu être observée en ce qui concerne la distance, les participants donnant des réponses plus proches de leur largeur réelle à courte distance. Alors qu'en ce qui concerne la scène visuelle, les meilleures réponses ont été données dans l'environnement sans aucune indication de mesures.

### **Discussion**

Cela montrerait que, même si la perception de l'espace dans le monde virtuel est quelque peu déformée, il existe des dynamiques très similaires et qui se chevauchent avec celles du monde réel.

### **Conclusion**

Ce travail peut être considéré comme une prémisse pour les futurs travaux à développer sur la perception et la vision dans la réalité virtuelle.

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| 1 Introduction .....                         | 5  |
| 1.1 Le monde réel.....                       | 5  |
| 1.2 Le monde virtuel .....                   | 12 |
| 1.3 Problématique.....                       | 16 |
| 1.4 Objectif du travail.....                 | 18 |
| 1.5 Question de recherche .....              | 19 |
| 1.6 Hypothèse.....                           | 19 |
| 2 Méthode.....                               | 20 |
| 2.1 Participants .....                       | 20 |
| 2.2 Design d'étude.....                      | 20 |
| 2.3 Description détaillée des méthodes ..... | 22 |
| 1.6 Analyse des données .....                | 25 |
| 3 Résultats .....                            | 27 |
| 4 Discussion .....                           | 31 |
| 5 Conclusion.....                            | 36 |
| Bibliographie.....                           | 38 |

# 1 Introduction

Nous avons la possibilité de juger avec précision les actions que nous pouvons effectuer dans notre environnement et de celles dont nous sommes incapables. Toutes ces actions sont possibles grâce à des commandes motrices qui analysent l'action à réaliser et aussi grâce à la connaissance de notre propre corps dans l'espace. L'activité dans l'espace ajoutée à la diversité des actions nécessite une représentation de notre corps en accord avec notre environnement (Gadsby & Williams, 2018). Cela se passe dans un environnement normal et donc dans une réalité concrète et tangible. Dans le monde moderne, cependant, l'être humain est de plus en plus lié à la technologie. C'est précisément dans ce contexte que s'inscrivent des technologies telles que la réalité virtuelle (RV), qui non seulement progressent et se développent au fil du temps, mais donnent également à l'homme la possibilité d'interagir, d'apprendre et de réaliser des activités dans un environnement entièrement nouveau. L'avantage de cette technologie est qu'elle donne la possibilité de créer facilement des scénarios réels et de les avoir à portée de main. Pour pouvoir créer ces scénarios aussi proches que possible de ceux de la réalité et ainsi les rendre aussi immersifs que possible, il faut apporter un grand soin aux dimensions, aux distances, à la profondeur et aux capacités d'action qui s'y trouvent (Bhargava, et al., 2020). Il est donc clair que cette technologie au potentiel immense a pour préalable la connaissance de concepts de base que l'on trouve dans le monde réel et qui doivent être transportés le plus fidèlement possible dans le monde virtuel. Ces concepts seront étudiés plus en détail dans les chapitres suivants.

## 1.1 Le monde réel

### *1.1.1 Les concepts de schéma et d'image corporelle*

Dans le passé, lorsqu'on faisait référence à la conscience et à la perception de son corps, cela comprenait l'ensemble des perceptions et des sensations corporelles qui proviennent de l'intérieur. En 1905, cette conception change grâce à Bonnier qui, pour la première fois, introduit le terme de schéma en référence à l'organisation spatiale. À partir de ce concept initial, un consensus croissant s'est dégagé au fil des années sur l'existence d'une représentation mentale du corps et de ses éléments constitutifs. Cette représentation mentale est généralement appelée schéma corporel ou image du corps (de Vignemont, 2010), ces deux termes ont ensuite été distingués l'un de l'autre et ont donc pris deux significations différentes. En général, le terme image corporelle fait référence à la perception de son corps et est quelque chose de conscient,

tandis que l'image corporelle est définie comme quelque chose d'inconscient et subsiste dans les actions du corps (Gadsby & Williams, 2018).

En y regardant de plus près, le schéma corporel est donc quelque chose de lié aux représentations sensorimotrices avec une orientation vers l'action. Ce schéma est une représentation de son corps en tant qu'entité effectrice et contient donc des informations sur les propriétés à court et à long terme de son corps (de Vignemont, 2010). Les informations à long terme sont des informations sur les proportions du corps, tandis que les informations à court terme sont des informations sur la position actuelle du corps et de ses membres. Ces informations sont d'une grande importance, car elles sont utilisées pour la prédiction d'une action et donc pour le contrôle moteur, tandis que le retour sensoriel qui revient de l'exécution de ladite action permet d'évaluer son efficacité (Gadsby & Williams, 2018). En effet, connaître les dimensions de son corps et la position qu'il occupe à chaque instant, permet à l'être humain de pouvoir évaluer la possibilité d'effectuer une action dans l'espace par rapport aux obstacles qu'il présente (Keizer, et al., 2013).

L'image corporelle, quant à elle, bien que sa définition ne soit pas encore totalement clarifiée, fait référence à l'image mentale que les gens ont de leur taille et de leur dimension corporelle. Cette définition inclut également les sentiments que les gens éprouvent à l'égard de ces caractéristiques constitutives de leur corps (Slade, 1988). Ainsi, le concept d'image corporelle se compose de deux éléments, à savoir la perception de la taille de son corps et les sentiments que l'on éprouve à l'égard de son corps (Skrzypek et al., 2001).

Le schéma et l'image corporelle, bien qu'il s'agisse de deux concepts distincts, interagissent l'un avec l'autre d'une manière que l'on appelle la co-construction. Entre ces deux parties, c'est le schéma de l'image corporelle qui a le plus de poids. Dans cette optique, le schéma corporel permet la création d'une image du corps, mais celle-ci peut à son tour influencer le schéma corporel s'il y a trop de différence entre ces deux parties. L'objectif de la co-construction est donc de minimiser autant que possible les différences entre le schéma et l'image corporelle. Dans un cadre normal, ces deux représentations corporelles convergent, mais dans le cadre pathologique une divergence est constatée (Pitron et al., 2018).

### ***1.1.2 Le concept d'affordance***

Dans les sciences cognitives contemporaines, de nombreuses études ont été réalisées concernant la psychologie écologique. De manière générale, on a théorisé qu'il existe un mécanisme cognitif qui permet aux sujets d'évaluer les propriétés géométriques de l'environnement dans lequel ils se trouvent, et grâce à cette information, le même sujet est capable de porter un

jugement sur les actions qui peuvent être réalisées dans cet espace spécifique (Somers, 2017). Il s'ensuit que l'action et la perception sont intrinsèquement liées. En effet, la perception fournit aux personnes les informations nécessaires sur l'environnement afin, qu'en les traitants, le sujet soit en mesure d'effectuer des actions appropriées (Gibson, 1958). Plus tard, le même Gibson, (2014) donne pour la première fois un nom à ce qu'est la possibilité d'effectuer une action, il la définit comme *affordance*. Plus précisément, Gibson la définit comme la relation entre le sujet qui observe le monde réel et sa capacité d'action dans celui-ci. Gibson décrit donc l'*affordance* d'un point de vue plutôt interactionnel, c'est-à-dire qu'il se concentre sur les informations directement fournies par l'environnement. En effet, il souligne comment, selon lui, l'*affordance* est directement liée aux caractéristiques physiques de l'environnement et aux propriétés physiques des sujets. La même idée est reprise plus tard par Michaels & Carello (1981) qui soutiennent que les sujets peuvent savoir quelles actions ils peuvent effectuer dans l'environnement grâce aux objets qui s'y trouvent. Il découle de cette définition que les *affordances* changent en fonction du moment et de la situation de référence, cela étant dû au fait que le corps ainsi que l'environnement sont constamment en mouvement et en changement (Warren, 1984). À partir de ces études, on comprend donc comment le milieu environnant et l'interaction des sujets avec ce milieu fournissent une grande quantité d'informations qui peuvent être traitées par le cerveau afin d'effectuer des évaluations des actions possibles dans l'espace. Ainsi, pour reprendre les concepts de manière plus générale, nous pouvons dire que grâce à la capacité d'*affordance* des sujets, qui leur permet d'évaluer les actions possibles en lisant l'environnement qui les entoure, il existe une perception directe de ces actions.

En résumant ces concepts, nous pouvons donc conclure qu'il existe des facteurs fondamentaux dont dépend la perception de la réalisation d'une *affordance*, à savoir : les objets de l'environnement, la capacité d'action de l'organisme, les caractéristiques physiques du sujet, les sources de stimuli sensoriels de l'organisme et enfin l'intégration des stimuli sensoriels multimodaux. Il est donc clair qu'en parlant d'*affordance*, nous entrons dans un sujet vaste où plusieurs facteurs entrent en jeu.

### ***1.1.3 Affordance et schéma corporel***

Au fil du temps, le concept d'*affordance* a été largement utilisé dans le domaine de la recherche scientifique afin de mieux comprendre le fonctionnement de la perception de son propre corps. Warren & Whang (1987) ont réalisé des tests dans lesquels les sujets devaient effectuer une tâche visuomotrice, c'est-à-dire qu'ils devaient évaluer la possibilité de passer par des portes de différentes largeurs. Leurs tests ont montré que chez les sujets normaux, il existait un rapport

critique fixe entre la largeur des épaules des sujets et la porte équivalant à 1,16 à 1,30, selon les différentes conditions utilisées. Grâce à cette tâche, il a été possible d'évaluer dans quelle mesure l'imagination visuomotrice des sujets est directement liée au système moteur. Par la suite, une étude similaire a été menée par Decety & Jeannerod (1996), dans ce cas les sujets sont passés par trois expériences différentes où dans la première le but était de trouver la largeur critique de l'ouverture de la porte pendant la marche tandis que dans les deux expériences suivantes la distance de l'ouverture était manipulée pour voir si l'affordance perçue était similaire à celle trouvée lors de la première expérience. Les résultats de cette étude sont en accord avec celle réalisée par Warren & Whang (1987), là encore le rapport entre l'ouverture et la largeur des épaules qui a été trouvé était de 1,30. Ils ont également constaté que la perception de la praticabilité des ouvertures était étroitement liée à la largeur de la porte par rapport à la hauteur statique des yeux de l'individu. De nombreuses autres études ont été réalisées sur la perception du schéma moteur à l'aide de tests d'affordance. La majorité des études de ce type ont porté sur des sujets souffrant d'anorexie nerveuse, c'est-à-dire ce type de psychopathologie appartenant aux troubles où l'on a une vision déformée de son propre corps (American Psychiatric Association, 2013). Dans ce type de sujet, en effet, le modèle inné que l'on a de son corps est complètement déformé par rapport à la réalité. Dans l'étude menée par Guardia et al. (2010), les sujets atteints de cette condition ont été testés afin de comprendre si ce type de sujet a tendance à se croire plus grand qu'il ne l'est en réalité. Au cours de l'étude, les sujets, en plus de répondre à des questionnaires, ont été testés physiquement lors d'une expérience où le sujet était placé devant des ouvertures de différentes tailles dans le but de comprendre si le sujet croyait pouvoir passer à travers ces ouvertures ou non. Cette expérience a montré que les sujets anorexiques surestimaient grandement leur largeur par rapport au groupe de contrôle. En effet, leurs réponses de passage à travers la porte étaient en moyenne beaucoup plus élevées que la largeur réelle de leurs épaules. Dans une autre étude menée par Guardia et al. (2012), la même expérience de passage de la porte a été à nouveau présentée à des sujets anorexiques et à un groupe de contrôle. Dans cette étude, cependant, contrairement à l'autre, se trouvent deux tâches différentes à effectuer. Dans la première, le sujet doit dire à la première personne s'il a réussi à franchir la porte ou non, alors que dans la deuxième expérience, le sujet donne sa réponse en considérant une tierce personne. La même expérience est ainsi répétée, mais à la troisième personne. Les résultats obtenus ont été très intéressants, en effet dans ce cas la surestimation du schéma corporel ne s'est révélée qu'au moment de la tâche à la première personne. Cela signifie que les sujets souffrant d'anorexie mentale ont tendance à surestimer uniquement leur propre schéma corporel, mais pas celui des autres. Ce résultat est intéressant dans la mesure où il



indique que les sujets souffrant d'anorexie mentale sont incapables d'estimer la taille en général, mais seulement leur propre taille car ils ont une vision écartelée de leur corps et ont donc un schéma corporel qui n'est pas équivalent à la réalité.

Par ailleurs, avec l'occlusion, il est possible d'obtenir des informations sur la distance relative. En effet, si un objet en occulte un autre, ce dernier sera perçu comme plus éloigné. Ainsi, les informations accompagnant ce type d'images permettent uniquement de savoir laquelle des surfaces vues est la plus proche et laquelle est la plus éloignée. Pour pouvoir donner cet ordre de profondeur, il est nécessaire que ces surfaces se superposent les unes aux autres par rapport à l'observateur (Brenner & Smeets, 2018).

La taille relative fait référence au fait que plus un objet est éloigné, plus son image rétinienne sera petite. Cela ne fonctionne que si l'observateur connaît la taille de l'objet, sinon il est difficile de faire une évaluation correcte, car deux objets de taille différente à distance égale sont perçus de manière incorrecte. En effet, dans une telle situation, l'objet le plus grand sera perçu comme plus proche que l'objet le plus petit, même si la distance est la même. Il n'en reste pas moins qu'il semblerait que dans chaque cas, les gens, même s'ils ne connaissent pas la taille exacte de l'image, disposent tout de même d'un retour d'information concernant la distance présumée. Cela s'explique par le fait qu'en regardant un objet précis, on peut faire une estimation de sa taille grâce à ses expériences de vie (Brenner & Smeets, 2018).

De même pour la taille relative, aussi pour la densité relative une plus grande distance est perçue pour les clusters de densité rétinienne plus élevée. Dans cette situation, si on a une scène avec des dimensions constantes dans l'espace, on peut tirer des informations importantes sur la profondeur de la scène. À titre d'exemple pratique, nous pouvons penser à un sol carrelé. Si l'observateur se tient perpendiculairement aux lignes, il verra que l'angle des lignes change linéairement avec l'inverse de la distance. Cela est également vrai pour la densité des objets répartis dans la scène, c'est-à-dire que la densité de l'image rétinienne augmente lorsque sa taille diminue. Avec ces informations, il est donc possible d'obtenir des informations sur la distance, mais une condition préalable à l'utilisation correcte de ces indices est que les objets doivent être identiques ou similaires et placés de manière ordonnée ou aléatoire dans la scène visuelle (Brenner & Smeets, 2018).

Grâce à la hauteur du champ visuel, en revanche, il est possible de savoir si un objet est éloigné ou non, car si l'on regarde un objet proche, on aura tendance à regarder vers le bas, alors que pour les objets éloignés, le regard est fixé vers l'horizon. Contrairement à l'occlusion, il n'est pas nécessaire de comparer le chevauchement de deux surfaces ou plus pour déterminer la distance qui les sépare de l'observateur (Brenner & Smeets, 2018).

Une perspective aérienne indique l'incapacité de distinguer les objets avec une distance croissante, ceci est causé par la pollution atmosphérique et/ou l'humidité rendant les objets observés plus brumeux. Il en résulte une diminution du contraste au fur et à mesure que la distance entre l'observateur et l'objet augmente. Évidemment, ce type de visibilité peut varier en fonction du lieu et de la qualité de l'air (Cutting, 1997).

La convergence de perspective se produit lorsqu'on regarde deux lignes parallèles et que celles-ci sont perçues par l'observateur comme convergeant à mesure qu'elles s'éloignent l'une de l'autre (Goldstein, 2010).

Les indices fournis par les dimensions familières, en revanche, se produisent lorsque, en regardant une scène, on juge ses dimensions et ses distances sur la base des objets présents et dont on connaît les dimensions. Ainsi, dans certaines situations, la connaissance de la taille des objets peut influencer la perception de la distance (Goldstein, 2010).

Le gradient de texture, quant à lui, est cet effet par lequel des objets équidistants dans une scène semblent plus proches les uns des autres à mesure que leur distance augmente (Goldstein, 2010). Enfin, les ombres peuvent également fournir des informations très importantes sur l'emplacement des objets dans la scène visuelle. En effet, regarder le même espace avec et sans ombres peut faire varier considérablement la perception de la position des objets dans l'espace. En outre, les ombres peuvent à nouveau donner à la scène et aux objets un effet de tridimensionnalité (Goldstein, 2010).

#### ***1.1.4 La vision dans le monde réel***

En général, pour percevoir l'espace tridimensionnel et la profondeur, l'être humain peut s'appuyer sur trois sources d'information principales, à savoir les informations monoculaires, les informations binoculaires et les indices oculomoteurs, et c'est par leur fusion que la profondeur est perçue. Les informations provenant des indices oculomoteurs sont basées sur la perception de la position des yeux et de la tension des muscles oculaires, les indices monoculaires proviennent d'un seul œil tandis que les indices binoculaires dépendent des deux yeux (Goldstein, 2010).

La vision monoculaire permet de percevoir des informations telles que l'éclairage et l'ombrage, le mouvement, la perspective, la taille de l'objet regardé ou sa hauteur, etc. Toutes ces informations sont dites picturales. En général, de nombreux types d'indices picturaux sont reconnus, à savoir : l'occlusion, la taille et la dénomination relatives, la hauteur dans le champ de vision et la perspective aérienne (Cutting & Vishton, 1995), la convergence des perspectives, les magnitudes familiales, la texture des gradients et les ombres (Goldstein, 2010).

L'information issue de la vision binoculaire est donnée par la superposition des champs visuels des deux yeux. Les deux yeux sont espacés de plusieurs centimètres, ce qui fait que l'image projetée sur la rétine de chaque œil est légèrement différente. La différence la plus importante réside dans le fait que les points des images arrivant sur la rétine sont décalés horizontalement, c'est ce qu'on appelle la disparité horizontale. En plus de cela, il existe ce que l'on appelle la disparité verticale, qui peut être obtenue par exemple lorsqu'un œil est plus proche de l'objet que l'autre. La disparité horizontale communique des informations sur la profondeur relative tandis que la disparité verticale apporte des informations sur la distance absolue (Braunstein, 2006).

Enfin, les repères oculomoteurs sont donnés par ce qu'on définit comme la vergence et l'accommodation. La convergence est définie comme le moment où, dans les deux yeux, l'image d'un objet placé à une distance proche se trouve sur les points correspondants des deux rétines, tandis que l'accommodation désigne la mise au point du cristallin des yeux pour obtenir une image nette d'objets placés à des distances différentes (Peli, 1995). L'accommodation, quant à elle, décrit la modification de la courbure du cristallin qui se produit lors de la mise au point sur des objets placés à différentes distances (Renner et al., 2013). Normalement, les informations générales concernant la profondeur et donc la capacité à voir un environnement en trois dimensions sont fournies par la combinaison d'informations picturales, oculomotrices et binoculaires. Les informations picturales sont bidimensionnelles, mais grâce au système visuel, on est capable de les percevoir comme un environnement tridimensionnel (Armbrüster et al., 2008). En effet, dans des conditions réelles, on a des mouvements oculaires de vergence et d'accommodation de l'œil qui continuent à varier avec la distance d'un objet (Wann et al., 1995). En plus de la convergence et de l'accommodation, la disparité binoculaire permet la perception de la profondeur de l'environnement. Un rôle important est joué par la distance entre l'observateur et l'objet observé ; en effet, pour des distances allant jusqu'à cinq mètres, la disparité binoculaire joue le rôle le plus important dans la perception de la profondeur, tandis que l'accommodation et la convergence exercent une influence moindre (Armbrüster et al., 2008). Pour les distances définies comme personnelles, c'est-à-dire avec une distance entre l'observateur et l'objet allant jusqu'à deux mètres, la disparité, l'accommodation et la convergence sont principalement utilisées (Cutting & Vishton, 1995). Si, en revanche, on se déplace dans la gamme des distances comprises entre deux et trente mètres, c'est l'espace d'action, l'occlusion et la parallaxe qui joueront un rôle plus important. Enfin, pour les distances supérieures à trente mètres, seule l'information picturale de la scène est utilisée, c'est-à-dire que des informations telles que la taille relative ou l'occlusion sont prises en compte (Renner et al., 2013).

## **1.2 Le monde virtuel**

Les technologies dites de réalité virtuelle utilisent l'infographie en combinaison avec des dispositifs de visualisation pour recréer ce qu'on appelle des environnements virtuels et permettre aux utilisateurs de s'y immerger. L'environnement virtuel est défini comme un espace tridimensionnel interactif, dans lequel la programmation informatique peut être utilisée pour créer des espaces dans lesquels des objets ou des personnes peuvent être placés et avec lesquels les utilisateurs peuvent interagir (Bryson, 1995). Grâce à cette technologie, les gens peuvent s'immerger dans un monde virtuel en s'y déplaçant et en regardant les choses sous différents angles et perspectives ; ils peuvent également interagir avec les objets qui sont placés dans cet environnement (Zheng et al., 1998). Il existe différents types de RV et, à ce titre, elles présentent des caractéristiques différentes les uns des autres. En général, ce qui change, c'est la configuration, c'est-à-dire le nombre d'écrans montés par la technologie et la complexité de ceux-ci. Aujourd'hui, on peut identifier deux types de technologies virtuelles, qui diffèrent principalement en ce qui concerne l'interaction du sujet avec l'écran, c'est-à-dire soit des écrans montés directement sur la tête (HMD), soit la technologie appelée système VR de type CA-VE qui consiste en une pièce où les murs font office d'écrans. Dans le cas du système HMD, les écrans sont donc placés si près des yeux de l'utilisateur que celui-ci ne peut même pas faire le point sur eux. Par conséquent, pour que l'utilisateur puisse faire la mise au point, on a utilisé une optique qui permet une distance d'accommodation correspondant à l'image virtuelle à une plus grande distance. Si l'on fait une comparaison entre ces deux types de technologie virtuelle, il est évident que, les écrans étant placés à des distances très différentes, il y a un problème avec les différentes distances d'accommodation (Vienne et al., 2020).

### ***1.2.1 Réalité virtuelle et système perceptif***

L'être humain est capable de percevoir le monde extérieur grâce au système sensoriel, c'est-à-dire grâce aux organes des sens, qui sont équipés de cellules sensorielles spécialisées, permettant de capter des signaux et des informations du monde extérieur. Ces signaux sont transduits et envoyés électriquement au cerveau, qui peut alors les traiter par le processus de transduction. Le processus perceptif comporte sept étapes entre l'arrivée du stimulus environnemental, sa perception, sa reconnaissance et enfin l'action qui suit. Les sept étapes reconnues sont : l'absorption d'informations provenant du stimulus environnemental, l'activation des récepteurs appropriés, le traitement des informations d'abord par les récepteurs puis par les neurones, puis la perception, la reconnaissance et l'action générée en réponse au stimulus (Goldstein & Cacciamani, 2021).

Pour pouvoir structurer un système de réalité virtuelle aussi proche de la réalité que possible, il faut connaître les principes de fonctionnement du système perceptif humain, car l'objectif est d'obtenir une immersion à 360° dans le monde virtuel. Les nouveaux systèmes virtuels sont conçus pour créer une stimulation multimodale. En effet, il est désormais connu que l'intégration perceptive des informations multimodales parvenant à nos organes des sens est d'une importance vitale pour la perception de nous-mêmes et du monde qui nous entoure. De nombreuses recherches ont porté sur ce concept afin de mieux comprendre quelles variables sont importantes pour recréer l'illusion du transfert du corps dans une autre réalité. Il a été prouvé que pour avoir un meilleur sentiment de présence dans le monde virtuel, il est important d'en faire l'expérience directe et que la combinaison des retours visuels et proprioceptifs augmente encore ce sentiment (Bohil et al., 2011).

Outre toute une série de points positifs de la technologie RV, il existe également des points critiques qui doivent être abordés. Dans ce contexte, ce qu'on appelle le cybersickness (mal du virtuel ou le cyber-maladie) est très répandu. Ce problème est donné par une divergence entre les informations visuelles qui arrivent et le retour vestibulaire, cela signifie que les informations visuelles qui suggèrent à la personne qu'un mouvement est en train d'avoir lieu mais cela ne se reflète pas dans le retour vestibulaire, créant chez la personne un sentiment d'inconfort (Bohil, et al., 2011).

### ***1.2.2 Affordance et schéma corporel dans la réalité virtuelle***

Avec le passage des années et le développement conséquent des technologies, ce qu'on appelle aujourd'hui la réalité virtuelle a vu le jour. Il est donc intéressant de voir comment la perception du schéma corporel et par conséquent l'affordance sont transportés dans cet environnement entièrement nouveau et comment la perception de la réussite de la tâche change en conséquence. Dans le monde virtuel, on n'a pas la présence du corps physique et on a donc ce qu'on appelle la téléportation, qui est la sensation que l'on perçoit lorsqu'on se trouve dans un environnement où l'on ne se trouve pas vraiment (Coelho et al., 2014). Dans l'étude menée par Bhargava et al. (2020), l'expérience de passabilité de la porte est réalisée et dans ce cas, ce qui est intéressant est de comparer le monde réel avec un environnement virtuel. Ainsi, dans cette expérience, nous avons trois groupes de sujets qui réalisent chacun une expérience différente : un groupe réalise l'expérience dans le monde réel, un groupe réalise l'expérience dans le monde virtuel à la première personne et un groupe réalise l'expérience dans le monde virtuel, mais à la troisième personne. Ce qui ressort de cette étude est qu'en général, dans un environnement, avant que les sujets n'identifient l'ouverture virtuelle comme surmontable, l'étendue de l'ouverture virtuelle

doit devenir significativement plus grande que dans le monde réel. En revanche, aucun résultat significativement différent n'a été constaté lors du jugement dans un environnement virtuel à la première personne ou à l'aide d'un avatar. Cette étude montre donc que lorsque l'ouverture s'approche de la largeur des épaules, le jugement des sujets sur la passabilité change, qu'ils soient placés dans le monde réel ou dans un environnement virtuel.

Une autre étude réalisée par Geuss et al. (2010) a utilisé la perception de l'affordance dans le monde virtuel pour comprendre comment les distances et les mesures sont évaluées dans un environnement virtuel. Dans cette étude, il s'agissait de comparer les estimations des distances, des amplitudes et les évaluations des affordances dans un environnement réel et virtuel. Les participants ont vu deux poteaux et ont été invités à indiquer avec leurs mains la largeur qu'ils pensaient qu'ils avaient (estimation de la taille), puis à indiquer s'ils pouvaient marcher à travers ou non (estimation de l'affordance) et enfin à marcher à l'aveugle à travers (estimation de la distance). Cette étude a montré une différence significative dans l'estimation de la distance à parcourir à l'aveugle entre les deux environnements, alors qu'aucune différence n'a été trouvée dans les jugements de taille et d'affordance. On pense que ce non-résultat peut être dû au fait que la tâche d'estimation survenant en premier peut avoir influencé d'une certaine manière la tâche d'affordance suivante. Ils concluent donc que des évaluations non biaisées pour les tâches d'affordance sont nécessaires dans l'environnement virtuel.

L'étude réalisée par Park et al (2021) a utilisé trois types d'environnement de réalité virtuelle. L'objectif de cette recherche était d'examiner la capacité des sujets testés à estimer les dimensions et les distances dans différentes scènes visuelles. Trois scènes ont été présentées, l'une avec des repères visuels minimaux, une autre avec des repères modérés et la dernière avec des repères maximaux. Les résultats de cette expérience ont montré que les sujets avaient tendance à sous-estimer la distance dans l'environnement avec des indices visuels maximum et minimum et à surestimer la distance dans l'environnement modéré. D'autre part, on a observé que l'estimation de la profondeur était meilleure dans l'environnement minimal que dans les autres, tandis qu'en ce qui concerne l'estimation de la magnitude, la meilleure performance a été observée dans l'environnement avec un maximum de repères visuels. En général, nous pouvons donc conclure de cette étude que les repères visuels familiers peuvent faciliter l'estimation de la taille et de la distance par rapport à un environnement avec des repères non familiers. En effet, nous avons constaté que dans l'environnement avec la présence de repères visuels auxquels les sujets n'étaient pas habitués, les réponses étaient moins bonnes que dans l'environnement sans aucun repère. L'étude menée par Gagnon et al. (2020), bien qu'elle ait été réalisée avec la réalité augmentée au lieu de la réalité virtuelle, peut néanmoins fournir des éléments de réflexion très

intéressants. Dans cette étude, les sujets devaient décider de franchir une ouverture qu'ils voyaient en réalité augmentée. L'accent a été mis sur la façon dont la distance affecte la perception des participants et l'hypothèse a été émise qu'à courte distance, cette perception serait altérée, car l'ouverture entière n'est pas visible dans tout le champ de vision. L'étude a montré que, contrairement à l'hypothèse, les jugements de passage étaient plus proches de la largeur des épaules des sujets lorsqu'ils étaient vus de près.

### ***1.2.3 La vision dans le monde virtuel***

Avec le développement conséquent des technologies, il est devenu possible de recréer des environnements du monde réel dans un environnement de réalité virtuelle. Avec les progrès de cette technologie et son utilisation croissante dans la vie quotidienne, de nombreuses questions se posent quant à son fonctionnement. Une question très importante concerne la perception et l'évaluation de l'environnement dans la réalité virtuelle, et nous avons voulu étudier si celle-ci était déformée ou si elle pouvait être comparée en tous points au monde réel.

Au chapitre 1.1.4, nous avons vu comment l'œil humain était capable de percevoir les distances et les grandeurs par le biais d'informations et d'ajustements visuels, ce système n'est cependant pas aussi performant dans un environnement de réalité virtuelle. Il est évident que la vision d'une scène réelle ne peut être totalement identique à la même scène vue sur un écran plat. En effet, dans ce cas, les yeux doivent continuellement maintenir l'accommodation sur les écrans des spectateurs, même s'il y a des points de la scène reproduite à l'écran qui nécessitent des mouvements de vergence de la part des yeux, le sujet se retrouve avec un découplage entre vergence et accommodation (Wann et al., 1995). C'est ce découplage qui est aussi généralement à l'origine de la difficulté à combiner les informations binoculaires et, par conséquent, cela tend à donner aux gens de la fatigue ou de l'inconfort lors d'une utilisation prolongée de cette technologie (Hoffman et al., 2008). Le conflit entre vergence et accommodation découle également de l'incapacité du casque de réalité virtuelle à fournir des informations précises sur les différentes distances de vision. Il découle de ce problème que l'information binoculaire et la focalisation peuvent être à l'origine d'inégalités dans la perception spatiale (Condino et al., 2020 ; Peillard et al., 2020).

Il semblerait également que les actions dans le monde virtuel soient perturbées par la présentation artificielle des informations de profondeur dans une scène (Wann et al., 1995). En effet, certaines études ont montré que le monde virtuel est perçu comme plus plat que le monde réel (Interrante et al., 2004). Il existe toute une série d'études dans la littérature scientifique qui

démontrent très bien comment les distances et les magnitudes sont sous-estimées dans un environnement virtuel.

On pourrait penser que les caractéristiques inhérentes à la technologie, telles que la résolution de l'écran, la luminance ou l'orientation de l'affichage, pourraient exercer une influence sur la vision dans l'environnement virtuel. Comme le montre l'étude de Vienne et al. (2020), cela ne s'avère pas être le cas, puisqu'ils ont pu démontrer que ces facteurs intrinsèques ont peu ou pas d'effet sur la perception des distances. Dans cette étude, l'hypothèse est également émise que c'est le conflit entre l'accommodation et la vergence qui influence la perception des distances et que celui-ci est plus perturbant dans un environnement vide que dans un environnement riche en informations visuelles. Ainsi, c'est l'ampleur de ce conflit qui influence le biais perceptif et la sensibilité à la profondeur.

Comme vu précédemment, des nombreuses autres études se sont concentrées sur les problèmes de perception de la profondeur que l'utilisation de visionneuses de réalité virtuelle peut donner. En particulier dans cette série d'études, les auteurs se sont concentrés sur la façon dont les magnitudes et les distances ont tendance à être sous-estimées.

Une étude qui a cherché à démontrer comment la perception des distances est déformée dans la réalité virtuelle est celle menée par Armbrüster et al (2008). Ils ont fait estimer la distance de dix objets dans deux conditions différentes, c'est-à-dire soit un objet à la fois, soit tous ensemble. Cette étude a montré que, même si tous les sujets étaient capables de bien définir quel objet était le plus proche et quel objet était le plus éloigné, les sujets avaient tendance à sous-estimer la distance virtuelle. Une autre étude très intéressante ayant le même objectif que la précédente est celle menée par Witmer & Sadowski (1998), dans ce cas les sujets étudiés étaient confrontés à un environnement en réalité virtuelle et au même environnement en réalité. On leur a demandé de marcher à l'aveugle afin de voir comment l'estimation de la distance différait dans les deux environnements. Les résultats finaux ont montré qu'il existe une différence entre la réalité et la réalité virtuelle, le taux d'erreur étant nettement plus élevé dans cette dernière.

### **1.3 Problématique**

Dans les chapitres précédents, nous avons donc vu comment l'être humain, grâce à son système perceptif et visuel, est capable d'évaluer quelles actions sont possibles dans un environnement et lesquelles ne le sont pas ; cette capacité est définie comme l'affordance. Cette capacité est étroitement liée à la perception que nous avons du monde extérieur et à la perception de notre propre corps. En effet, pour comprendre si une action est possible ou non, il est nécessaire de connaître les distances et les caractéristiques de l'environnement dans lequel nous sommes



plongés. Il est également très important de connaître et d'avoir une bonne perception de notre propre corps et de notre taille, afin de pouvoir prévoir le plus précisément possible les actions possibles dans l'environnement dans lequel nous nous trouvons. Dans le cadre de ce travail, il était également important de comprendre et d'étudier comment l'œil humain est capable de percevoir la distance dans le monde réel. Nous avons donc passé en revue toutes les caractéristiques de l'environnement et des objets qui sont nécessaires pour pouvoir évaluer les distances. En outre, il a également été montré comment, pour faire cette évaluation, les capacités des yeux eux-mêmes sont primordiales, car il a été vu comment la vergence, l'accommodation et la disparité binoculaire jouent un rôle clé dans la perception des distances. Après avoir examiné ces caractéristiques de l'environnement réel, nous sommes passés à l'analyse de l'environnement virtuel, afin de voir si les capacités de perception pouvaient également être transférées dans ce monde. Malheureusement, en raison des caractéristiques inhérentes à cette technologie, les capacités ne peuvent être transportées comme elles le sont dans le monde réel. En effet, la réalité virtuelle est composée d'écrans fixes qui tentent de donner à l'œil humain une simulation d'un environnement réel. Bien que les nouvelles technologies parviennent très bien à simuler ce phénomène, certaines critiques persistent. L'une d'entre elles, qui est importante et difficile à résoudre, est le découplage de la vergence et de l'accommodation. En effet, en regardant dans un casque de réalité virtuelle, nous sommes confrontés à deux écrans à une distance fixe, ce qui oblige l'œil humain à les accommoder en permanence. Ainsi, alors que dans la scène virtuelle, certains stimuli exigent une accommodation continue de la vergence des yeux, les écrans exigent une accommodation continue sur l'écran. Nous avons donc un découplage entre la vergence et l'accommodation, où la vergence change avec l'entrée visuelle tandis que l'accommodation reste inchangée. Ce découplage peut également donner lieu à ce qui est appelé le cybermaladie et reste donc un problème critique pour beaucoup d'utilisateurs de cette technologie. Outre le sentiment d'inconfort, comme nous l'avons vu plus haut, ce découplage semble également être le point critique pour lequel il serait plus compliqué de faire des estimations de distance précises dans l'environnement virtuel.

À partir de cette partie théorique, nous comprenons que la vision dans le monde réel et la vision dans le monde virtuel changent et ne peuvent être identiques. Certaines études montrent que, dans l'environnement virtuel, la perception du monde et des distances est déformée. Dans l'environnement réel, si nous regardons une ouverture, nous sommes en mesure d'évaluer si nous pouvons ou non passer à travers en évaluant deux informations principales, soit l'idée de notre schéma corporel et la taille de l'ouverture. En outre, pour évaluer une ouverture dans le monde réel, la distance qui la sépare et son évaluation sont importantes. Certaines études montrent en

effet que l'évaluation d'une tâche d'affordance est plus facile à une distance plus proche de la cible qu'à une distance plus grande.

Avec cette étude, nous voulons vérifier si, comme dans le monde réel, la perception de l'environnement et la perception des possibilités d'interaction avec celui-ci dans l'environnement virtuel seront influencées par la distance de la cible et la nature de la scène visuelle. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé une tâche d'affordance qui exige des participants qu'ils connaissent leur propre corps et qu'ils évaluent l'environnement dans lequel ils sont placés. Nous demandons donc aux individus non seulement de connaître leurs propres proportions corporelles, mais aussi d'être capables d'évaluer les grandeurs dans le monde virtuel.

#### **1.4 Objectif du travail**

L'objectif de ce travail est de déterminer si la perception et l'évaluation de l'espace et des interactions possibles dans l'environnement virtuel sont identiques ou similaires à ce qui se passe dans le monde réel. Plus précisément, nous avons l'intention d'étudier si la distance et la nature de la scène visuelle exercent une influence significative sur la performance d'une tâche d'évaluation des affordances dans l'environnement virtuel. Pour répondre à cette question, nous avons décidé de nous baser sur des travaux expérimentaux déjà réalisés où l'on demandait aux participants de prédire s'ils allaient réussir ou non à franchir des ouvertures (portes) placées dans le monde réel. Ce que nous avons voulu faire, c'était donc de reproduire ces études dans un environnement virtuel. L'étude est basée sur une tâche d'affordance dans laquelle les sujets sont placés devant une ouverture à différentes distances dans la réalité virtuelle, puis il leur est demandé s'ils pourront franchir cette ouverture sans avoir à effectuer de mouvement de rotation du torse et de l'épaule. Dans cette étude, deux facteurs seront manipulés, à savoir la largeur du diaphragme et sa distance par rapport au sujet. Afin de disposer d'une méthode plus propre, il a été décidé que les participants devaient effectuer la tâche d'affordance dans deux environnements virtuels différents :

- a) Dans le premier environnement, l'ouverture sera placée dans un environnement riche en informations utiles à l'œil et au cerveau qui peuvent être traitées afin de comprendre et d'évaluer la taille de l'ouverture. Cet environnement permet ensuite aux sujets d'avoir une sensation de distance et d'évaluer la taille de la scène.
- b) Dans le second environnement, l'ouverture sera placée dans un environnement plutôt stérile et donc dépourvu de tout type d'information de mesure. Dans ce cas, les sujets ne peuvent compter que sur la perception de la profondeur basée sur la disparité binoculaire.

Dans les études précédentes, des mesures de différentes ouvertures étaient effectuées et la moyenne entre celles-ci était réalisée, mais cette méthode entraîne des biais importants. Dans ce travail, ce qui sera utilisé est le starecase adaptatif, qui est une méthodologie adaptative utile pour définir le seuil. Avec cette méthode, on obtiendra des résultats plus propres et moins biaisés (Audiffren & Bresciani, 2022).

### **1.5 Question de recherche**

Dans l'environnement virtuel, la perception de l'environnement et la perception des possibilités d'interaction avec celui-ci seront-elles influencées par la distance entre la cible et le sujet ? Le fait d'avoir des indices de dimension dans la scène visuelle qui aident à mieux comprendre les dimensions de l'environnement peut-il faciliter la tâche ?

### **1.6 Hypothèse**

H1. L'hypothèse est qu'à différentes distances, la perception des sujets change et que, par conséquent, à des distances plus courtes, il sera plus facile d'évaluer l'environnement virtuel, alors qu'à des distances plus élevées, il sera plus difficile de faire des évaluations précises et exactes de l'environnement et des objets qu'il contient.

H2. La deuxième hypothèse que nous avons posée est que dans un environnement qui fournit au sujet divers indices de taille dans la scène visuelle, il sera plus facile de faire une prédiction véridique que dans un environnement sans indices de taille dans la scène visuelle.

## 2 Méthode

### 2.1 Participants

L'échantillon de recherche était constitué d'un groupe d'adultes en bonne santé. Trente sujets (12 femmes et 18 hommes) âgés de 21 à 60 ans (moyenne =  $27 \pm 8$ ) ont participé à l'expérience. Tous les participants ne connaissaient pas l'objet de l'étude et avaient une vision normale ou corrigée à la normale. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé écrit avant d'être inclus dans l'étude, qui a été menée conformément aux normes éthiques spécifiées par la Déclaration d'Helsinki de 1964 et approuvée par le Comité d'éthique de l'Université de Fribourg.

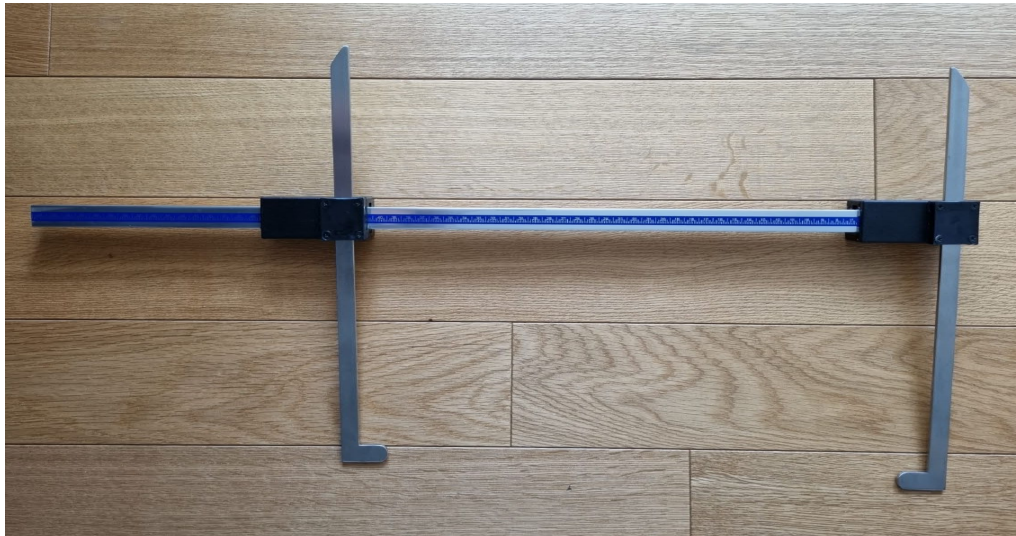
### 2.2 Design d'étude

Afin de définir les proportions corporelles des sujets, des mesures ont été prises au niveau du tronc du corps. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un anthropomètre (Figure 1), qui permet de connaître la largeur du corps du sujet. Les sujets ont ensuite été mesurés en largeur en trois points au niveau du torse, à savoir au niveau de l'épaule, du deltoïde et du triceps. Cette mesure est utilisée pour trouver la largeur maximale du corps, qui correspond à la distance entre les deux points latéraux du corps les plus éloignés. Pour la plupart des individus, la largeur maximale du corps est mesurée au niveau du deltoïde, c'est-à-dire qu'elle correspond à la largeur des épaules. Cependant, chez certains individus, notamment les plus musclés, la largeur maximale du corps peut être mesurée au niveau des triceps ou des coudes (en position immobile, bras en travers du corps).

Ces deux mesures nous ont permis d'observer le schéma corporel des sujets testés. Deux environnements ont été créés dans l'ordinateur (CoPeLab BodyPerception version : 1.0). Un environnement appelé « park » (Figure 2) avec des indices de taille relatifs et un autre environnement sans aucun indice de taille appelé « palace » (Figure 3). Chaque sujet a traversé les deux environnements différents à deux distances définies différentes, à savoir deux mètres et quatre mètres. Le résultat est que chaque sujet, dans une séance de mesures, a vécu quatre expériences différentes. Cependant, les sujets n'ont pas eu le même ordre de passage. En effet, un ordre de passage aléatoire a été défini afin qu'aucun sujet n'ait le même.

En raison de la facilité de transport du matériel, les mesures ont été effectuées à différents endroits. Cela a permis de collecter des données dans le lieu où le sujet préférait et grâce à cela, il n'y a pas eu trop de difficultés pour trouver des personnes.

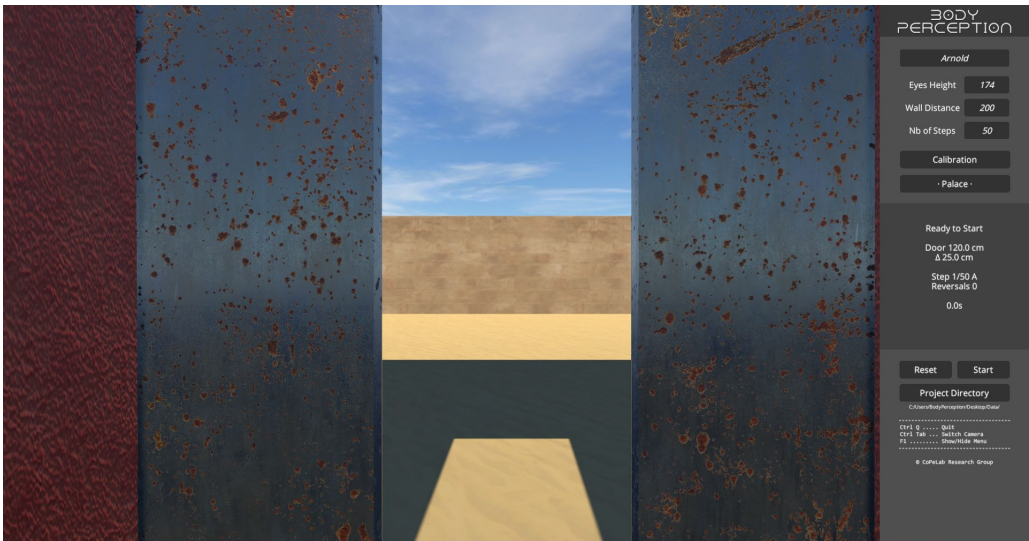
**Figure 1**  
*Anthropomètre*



**Figure 2**  
*Park*



**Figure 3**  
*Palace*



### 2.3 Description détaillée des méthodes

Les sujets ont été testés individuellement à l'endroit de leur choix. Les mesures ont été possibles dans toutes les situations grâce à un matériel facilement transportable, la seule condition étant qu'une prise électrique soit disponible pour brancher le matériel électronique. Avant le test, nous avons demandé aux sujets différentes informations afin de me faire une idée des personnes testées et de leur corpulence (Tableau 1).

**Tableau 1**  
*Informations individuelles*

| Nom Prenom | Annee Naissance | Sexe | Taille | Poids | Largeur biacromiale | Largeur epaules | Largeur max | Hauteur yeux | Expérience 1 | Expérience 2 | Expérience 3 | Expérience 4 |
|------------|-----------------|------|--------|-------|---------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|            |                 |      |        |       |                     |                 |             |              |              |              |              |              |
|            |                 |      |        |       |                     |                 |             |              |              |              |              |              |
|            |                 |      |        |       |                     |                 |             |              |              |              |              |              |
|            |                 |      |        |       |                     |                 |             |              |              |              |              |              |

En plus de ces informations de base fournies par les sujets, la largeur biacromiale a également été mesurée comme la largeur maximale du corps à l'aide d'un anthropomètre qui mesure la largeur du sujet au millimètre près. La largeur biacromiale correspond à la largeur des deux points latéraux des os acromioniques et cette mesure est donc basée uniquement et exclusivement sur la structure osseuse de la personne examinée. La largeur maximale du sujet, quant à



elle, prend également en compte les tissus mous du corps, c'est-à-dire la graisse et la masse musculaire. Avant de commencer le test, en plus de ces mesures, il était nécessaire de mesurer la hauteur des yeux de chaque participant. Cette mesure a ensuite été saisie dans l'ordinateur afin que, pendant toute l'expérience, la vision de chaque sujet soit aussi proche que possible de la réalité. Un calibrage était également nécessaire pour que chaque sujet soit centré sur l'ouverture pendant chaque expérience. Pour les mesures avec le casque de réalité virtuelle, il a été demandé aux sujets de se tenir debout de manière à pouvoir imaginer au mieux l'ouverture de la porte et à se placer le plus possible dans une situation comparable à celle de la réalité (Figure 4).

Une fois que les sujets ont reçu le matériel d'expérimentation, l'objectif de l'étude leur a été expliqué, la tâche à accomplir leur a été expliquée précisément et ils ont été invités à signer le formulaire de consentement pour la collecte des données de manière totalement anonyme. Les sujets ont également reçu les instructions suivantes à suivre lors de la réalisation des mesures :

- Pendant toute la durée de l'expérience, essayez de maintenir une concentration maximale.
- Une pause peut être faite entre les différentes conditions si le besoin s'en fait sentir.
- À tout moment, il est possible d'interrompre l'expérience en cas de problème ou de malaise.

#### **Figure 4**

*Positionnement du sujet pendant l'expérience*



À chaque étape, le sujet était immergé dans un environnement virtuel avec ou sans indication de la taille de l'environnement dans lequel il se trouvait. À chaque étape, le sujet était placé devant une ouverture située à deux ou quatre mètres et cette ouverture ne changeait pas pendant la durée de l'étape. Cependant, l'ouverture a varié en largeur après chaque réponse donnée. Le sujet était placé devant chaque ouverture pendant une durée de cinq secondes, puis pendant trois secondes l'écran restait noir et il devait répondre à la question suivante : « Est-ce que je passe ? » (Figure 5).

Le passage s'est déroulé comme expliqué ci-dessus, sous la forme d'un mouvement rectiligne sans rotation des épaules. Nous lui avons remis une boîte avec deux boutons (Figure 6). Cette boîte a servi de répondre aux questions. Un bouton rugueux (noir) signifie « oui » et un bouton lisse (blanc) signifie « non ». En fonction de la réponse du sujet, le logiciel a automatiquement modifié l'ouverture.

## Figure 5

*La réponse à donner suite à l'observation de l'ouverture*





## Figure 6

*La boîte avec laquelle donner les réponses*



Chaque expérience consistait en 50 ouvertures à travers lesquelles le sujet devait s'imaginer passer. Le nombre de 50 passages a été choisi afin d'observer la perception de l'environnement virtuel le plus précisément possible avec la procédure de l'escalier. Grâce à cela, il a été possible de trouver le seuil perceptif, c'est-à-dire l'ouverture critique perçue par les sujets. Cette dernière est l'une des procédures adaptatives les plus utilisées en psychologie physique en raison de sa grande précision et de sa performance globale (Audiffren & Bresciani, 2022). Cette procédure permet de calculer l'indice de praticabilité perçue : le rapport entre la largeur de l'ouverture et la dimension frontale la plus large à laquelle l'ouverture est perçue comme praticable.

### 1.6 Analyse des données

L'effet des deux facteurs et de leur interaction sur la variable dépendante a été évalué en utilisant une approche de modélisation linéaire à effets mixtes. Les deux facteurs principaux ont été introduits dans le modèle en tant qu'effets fixes, tandis que les intercepts des participants ont été introduits en tant qu'effets aléatoires. Un modèle incluant l'intercept et le facteur Scène visuelle comme prédicteurs, 3. un modèle incluant l'intercept et les facteurs Scène visuelle et Distance comme prédicteurs et 4. un modèle incluant le facteur Scène visuelle comme prédicteurs. Un modèle incluant l'intercept et les facteurs Scène visuelle et Distance comme prédicteurs. Un modèle qui inclut l'intercept, les deux facteurs comme prédicteurs et un terme

d'interaction. Les quatre modèles ont été comparés et les valeurs  $p$  ont été obtenues à l'aide de tests de rapport de vraisemblance. Les degrés de liberté ont été approximatés à l'aide de la méthode de Kenward-Roger (Halekoh & Højsgaard, 2014).

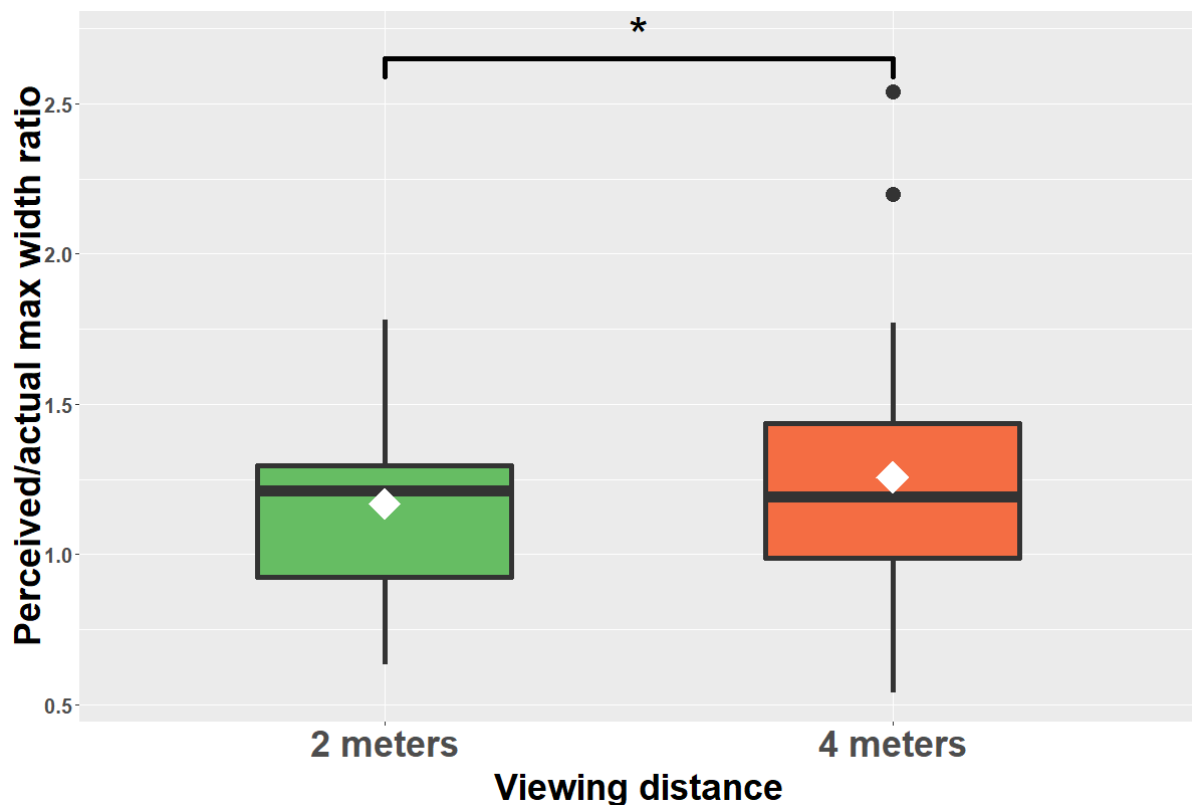
Les comparaisons directes des moyennes ont été effectuées à l'aide de tests de rang signés de Wilcoxon pour les mesures répétées et les effets de taille ont été estimés à l'aide de  $R$  de Pearson.

### 3 Résultats

D'une part, le rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps était significativement plus grand lorsque l'ouverture était vue à une distance de quatre mètres (moyenne = 1,25) que lorsqu'elle était vue à une distance de deux mètres (moyenne = 1,19) [ $\chi^2(1) = 4,24$ ,  $p < .05$ , voir Figure 7]. D'autre part, la relation entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps n'était pas influencée par la présence ou l'absence d'indices de taille dans la scène visuelle et il n'y avait pas d'interaction significative entre les deux facteurs.

**Figure 7**

*Rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps à deux mètres et à quatre mètres*



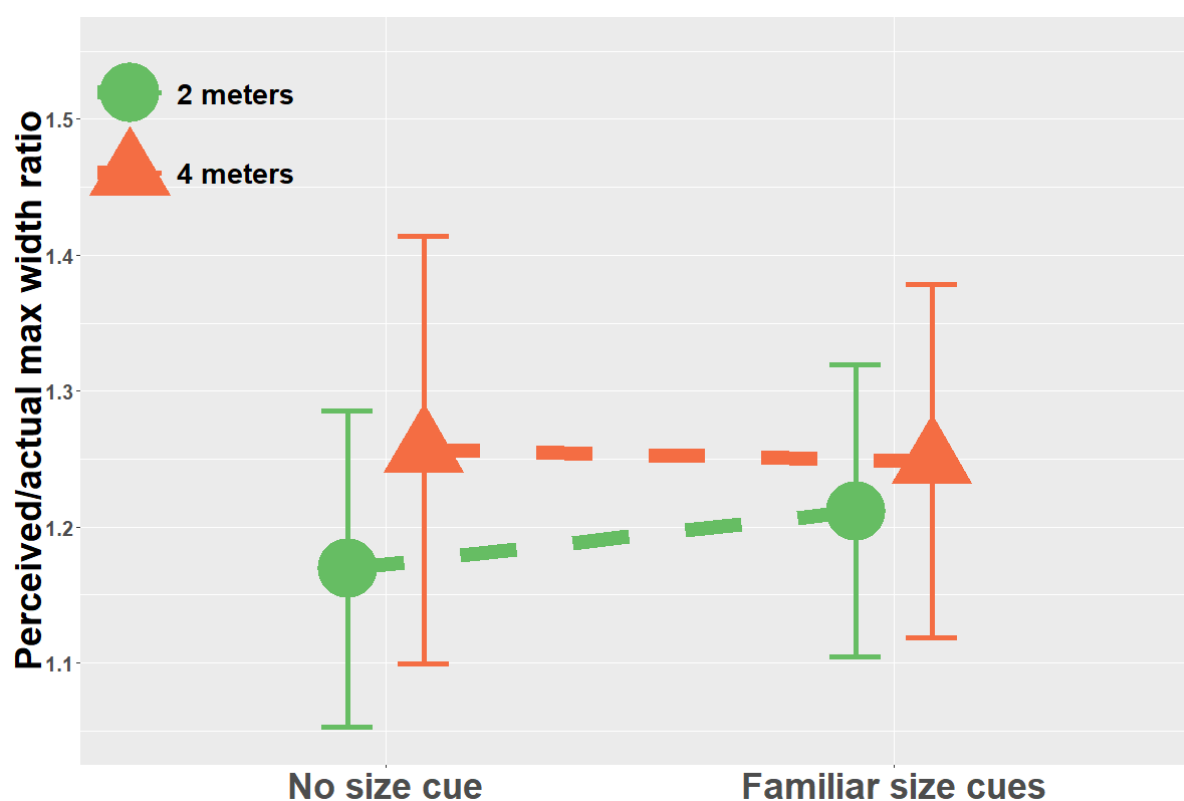
Le rapport largeur du corps perçu/réel a ensuite été comparé entre les distances d'observation de deux mètres et de quatre mètres pour les deux types de scène visuelle séparément.

Lorsque des indices de taille relative étaient présents dans la scène visuelle, le rapport largeur du corps perçu/réel n'était pas différent lorsque l'ouverture était vue à deux mètres (moyenne = 1,30) ou à quatre mètres (moyenne = 1,34) [ $p = 0,69$ ,  $R = 0,08$ , c'est-à-dire une petite taille d'effet, voir figure 8]. En revanche, lorsque la scène visuelle était dépourvue d'indices de taille,

le rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps était significativement plus important lorsque l'ouverture était vue à quatre mètres (moyenne = 1,35) que lorsqu'elle était vue à deux mètres (moyenne = 1,26) [ $p < .05$ ,  $R = 0,38$ , c'est-à-dire un effet de taille modéré, voir Figure 8].

**Figure 8**

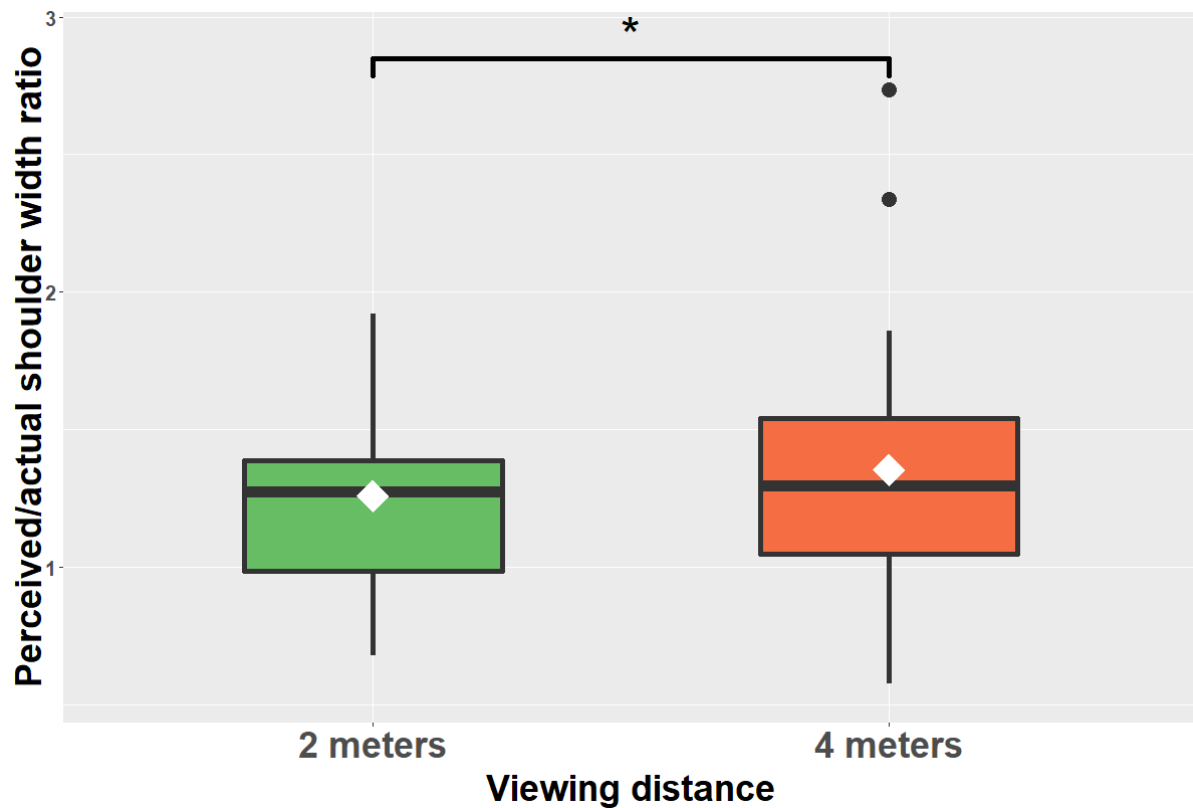
*Rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps avec une ouverture réglée à deux mètres et quatre mètres dans l'environnement avec repères visuels et dans celui sans repères visuels.*



Nous avons effectué la même analyse en utilisant la largeur des épaules au lieu de la largeur maximale du corps pour calculer le ratio. Le schéma des résultats est exactement le même que celui observé en utilisant la largeur maximale du corps. Plus précisément, lorsque l'ouverture était vue à une distance de quatre mètres, le ratio était significativement plus élevé (moyenne = 1,35) que lorsqu'elle était vue à une distance de deux mètres (moyenne = 1,28) [ $\chi^2(1) = 4,47$ ,  $p < .05$ , voir Figure 9]. Ni le type de scène visuelle ni l'interaction entre les deux facteurs principaux n'étaient significatifs.

**Figure 9**

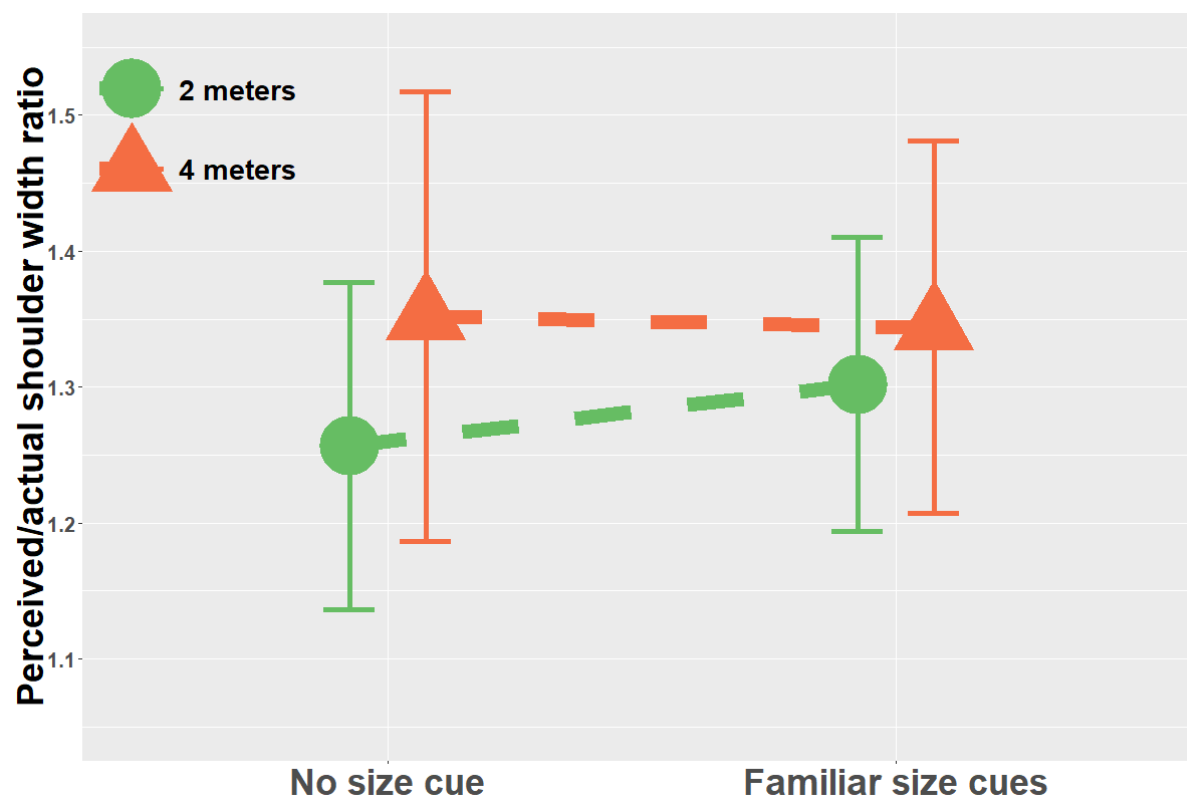
*Rapport entre la largeur perçue et la largeur des accotements à deux mètres et à quatre mètres*



Lorsque la scène visuelle était dépourvue d'indices de taille, le rapport était significativement plus important lorsque l'ouverture était vue à quatre mètres (moyenne = 1,35) que lorsqu'elle était vue à deux mètres (moyenne = 1,26) [ $p < .05$ ,  $R = 0.38$ , c'est-à-dire un effet de taille modéré, voir Figure 10]. En revanche, il n'y avait pas de différence significative entre les deux distances (rapport moyen = 1,30 à partir de deux mètres et 1,34 à partir de quatre mètres) lorsque des indices de taille étaient disponibles dans la scène visuelle [ $p = 0,66$ ,  $R = 0,08$ , c'est-à-dire une petite taille d'effet, voir Figure 10].

**Figure 10**

*Rapport entre la largeur perçue et la largeur des épaules avec une ouverture fixée à deux mètres et quatre mètres dans la pièce avec repères visuels et dans la pièce sans repères visuels*



## 4 Discussion

L'objectif de ce travail était d'observer si la perception de l'environnement dans le monde virtuel et la perception des possibilités d'interaction avec celui-ci sont influencées par la distance entre le sujet et la cible et le type de scène présentée. Nous avons donc voulu étudier comment le schéma corporel et l'environnement interagissent dans la réalité virtuelle et la question spécifique que nous nous sommes posés était de savoir comment cela affecte la capacité d'évaluation dans un environnement virtuel. Notre première hypothèse (H1) était qu'avec des distances différentes, la perception des sujets changerait et que, par conséquent, à des distances plus courtes, il serait plus facile d'évaluer l'environnement virtuel, alors qu'à des distances plus longues, la tâche serait plus difficile. En outre, nous avons également formulé une deuxième hypothèse (H2) pour laquelle nous avons supposé que lorsque la scène visuelle était dépourvue d'indices de taille, la tâche serait plus difficile que si le sujet était placé dans une scène riche en informations visuelles.

Tout d'abord, les résultats ont montré une différence significative entre le rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps lorsque l'ouverture était placée à une distance de quatre mètres par rapport à lorsqu'elle était vue à une distance de deux mètres. Pour l'ouverture placée à une distance de quatre mètres, en effet, nous avons une moyenne plus élevée (1,25) que celle que nous trouvons pour les ouvertures placées à une distance de deux mètres (1,19). Ce rapport nous indique donc que les sujets ont eu tendance à donner des réponses moyennes plus larges si les ouvertures étaient vues à une distance de quatre mètres que si elles étaient vues à deux mètres. D'une part, cela signifie qu'à des distances plus proches les sujets ont eu plus de facilité à comprendre les proportions des ouvertures et ont donc pu donner des réponses plus exactes et plus précises. D'autre part, le rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps n'était pas affecté par la présence ou l'absence d'indices de taille dans la scène visuelle et il n'y a pas eu d'interaction significative entre les deux facteurs. Ce résultat est très intéressant dans la mesure où il valide notre première hypothèse (H1) pour laquelle nous avons suggéré qu'à différentes distances, la perception des sujets change et que, par conséquent, à des distances plus courtes, il sera plus facile d'évaluer l'environnement virtuel tandis qu'à des distances plus grandes, il sera plus difficile de faire des évaluations précises et exactes de l'environnement et des objets qui s'y trouvent. Quant à notre deuxième hypothèse (H2), c'est-à-dire celle pour laquelle nous avons supposé que dans un environnement qui fournit au sujet différentes informations visuelles donnant une indication claire de la taille dans la scène visuelle, il sera plus facile de faire une prédiction précise, elle n'a pas donné de résultats clairs et significatifs.

Ensuite, nous avons voulu comparer le rapport largeur du corps perçu/réel entre les distances de vision de deux mètres et de quatre mètres pour les deux types de scène visuelle séparément. Il est apparu que lorsque des indices de taille relative étaient présents dans la scène visuelle, le rapport largeur du corps perçu/réel n'était pas différent selon que l'ouverture était vue à deux mètres (moyenne = 1,30) ou à quatre mètres (moyenne = 1,34). En revanche, lorsque la scène visuelle était dépourvue de toute indication de taille, le rapport entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps était significativement plus élevé lorsque l'ouverture était vue à quatre mètres (moyenne = 1,35) que lorsqu'elle était vue à deux mètres (moyenne = 1,26). Ce résultat est particulièrement intéressant. Dans notre deuxième hypothèse (H2), nous avons suggéré que dans l'environnement avec des indications de taille dans la scène visuelle (park), il aurait été plus facile de faire une prédiction précise. Pourtant, pour l'environnement « park », nous n'avons pas eu de différence significative.

Après les considérations ci-dessus, nous avons décidé d'effectuer une analyse similaire à la précédente, mais au lieu de prendre la largeur maximale du corps des sujets, nous avons pris la largeur des épaules pour calculer le ratio. Le résultat est exactement le même que celui obtenu en utilisant la largeur maximale. En fait, même dans ce cas, les résultats ont montré une différence significative entre le rapport entre la largeur perçue et la largeur des épaules lorsque l'ouverture était placée à une distance de quatre mètres par rapport à celle vue à une distance de deux mètres. De nouveau, pour l'ouverture placée à une distance de quatre mètres, nous avons une moyenne plus élevée (1,35) que pour les ouvertures placées à une distance de deux mètres (1,28). Ce rapport montre, comme le précédent, que les sujets ont tendance à donner des réponses moyennes plus larges si les ouvertures sont vues à une distance de quatre mètres que si elles sont vues à deux mètres. Là encore, la relation entre la largeur perçue et la largeur des épaules n'était pas influencée par la présence ou l'absence d'indices de taille dans la scène visuelle et il n'y avait pas d'interaction significative entre les deux facteurs. Les résultats nous permettent de valider notre première hypothèse (H1) pour laquelle nous avons suggéré qu'avec des distances différentes, la perception des sujets change et que, par conséquent, à des distances plus courtes, il sera plus facile d'évaluer l'environnement virtuel, tandis qu'à des distances plus grandes, il sera plus difficile de faire des évaluations précises et exactes de l'environnement et des objets qui y sont placés. Même avec ces données, nous sommes obligés de reformuler notre deuxième hypothèse (H2), c'est-à-dire celle pour laquelle nous avons supposé que dans un environnement qui fournit au sujet une multitude d'informations visuelles, il sera plus facile de faire une prévision véridique que pour l'environnement sans repères visuels.



Enfin, nous nous sommes également intéressés ici à la comparaison du rapport largeur perçue/largeur d'épaule entre les distances de vision de deux mètres et de quatre mètres pour les deux types de scène visuelle séparément. Lorsque la scène visuelle ne comportait aucune indication de taille, le rapport était significativement plus élevé lorsque l'ouverture était vue à quatre mètres (moyenne = 1,35) que lorsqu'elle était vue à deux mètres (moyenne = 1,26). En revanche, il n'y avait pas de différence significative entre les deux distances (rapport moyen = 1,30 à partir de 2 mètres et 1,34 à partir de 4 mètres) lorsque des indices de taille étaient disponibles dans la scène. Encore une fois, comme vu précédemment, nous avons obtenu un résultat contraire à notre deuxième hypothèse (H2). Dans cette hypothèse, nous avons suggéré que dans l'environnement avec des indices de taille dans la scène visuelle (park), il aurait été plus facile de faire une prédiction précise que dans la scène sans informations visive.

En résumé, nous pouvons conclure de l'analyse des données que dans l'environnement virtuel, une composition d'affordances a été évaluée avec plus de précision à des distances plus courtes que la même tâche à des distances plus longues. Ce résultat a également été obtenu par Gagnon et al. (2020), dont l'étude a réussi à montrer que même en réalité augmentée, l'évaluation de la passabilité à travers une ouverture est plus proche de la largeur des épaules à des distances proches qu'à des distances plus éloignées. Avec cette étude, nous sommes donc parvenus à la même conclusion. En réalité, nous avons constaté que même dans un environnement entièrement virtuel, la distance par rapport à l'ouverture exerce une influence importante sur la réussite ou l'échec de la tâche d'affordances. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que dans les environnements de réalité virtuelle, on a tendance à sous-estimer les distances. Si les distances sont sous-estimées, les proportions et les grandeurs de l'ensemble de l'environnement auront tendance à être sous-estimées. En effet, l'étude d'Interrante et al. (2004) montre comment le monde virtuel est perçu comme plus plat que le monde réel. Cela signifie que les sujets ont tendance à sous-estimer la distance et, par conséquent, à sous-estimer également les magnitudes en général. Il se pourrait donc que ce soit précisément à cause de cette sous-estimation que les réponses situées à une plus grande distance de l'ouverture aient tendance à avoir un rapport plus grand entre la porte et la largeur des épaules ou la largeur maximale du corps. Il ne faut pas non plus oublier qu'avec le casque de réalité virtuelle, il y a ce qu'on appelle un découplage entre l'accommodation et la vergence. Cela signifie que les yeux doivent continuellement maintenir l'accommodation sur les écrans à visière, même si certains points de la scène reproduite sur l'écran nécessitent des mouvements de vergence de la part des yeux (Wann et al., 1995). Ce découplage, nous l'avons vu, conduit à son tour les sujets à sous-estimer les magnitudes (Vienne et al., 2020). Ce point aura donc également une influence importante sur l'évaluation des

magnitudes. En général, si les sujets sous-estiment les magnitudes, cela signifie qu'ils perçoivent les ouvertures comme étant plus petites qu'elles ne le sont en réalité et que la valeur du rapport sera donc plus élevée.

De plus, toujours dans cette analyse, la relation entre la largeur perçue et la largeur réelle du corps n'était pas influencée par la présence ou l'absence d'indices de taille dans la scène visuelle et il n'y avait pas d'interaction significative entre les deux facteurs. Pour la même distance, la tâche des affordances a été évaluée avec plus de précision dans un environnement sans indices de taille dans la scène visuelle que dans un environnement avec des informations de taille. Nous avons supposé qu'il serait plus facile d'effectuer une évaluation précise dans un environnement riche en informations sur la taille que dans un environnement qui en est dépourvu, car en général, comme nous l'avons vu plus haut, les objets placés dans l'environnement aident à mieux comprendre les quantités dans l'espace. En comprenant mieux les proportions, nous devrions donc être en mesure de mieux évaluer la taille de l'ouverture et, par conséquent, de donner des réponses plus précises concernant la largeur des épaules. De même, dans l'étude réalisée par Vienne et al. (2020), l'hypothèse a été émise que le conflit entre l'accommodation et la vergence influence la perception des distances et que cela est plus perturbant dans un environnement vide que dans un environnement riche en informations visuelles. Cette étude a révélé que l'ampleur de ce conflit influence le biais perceptif et la sensibilité à la profondeur. Nous avons donc pensé que ce conflit pouvait également influencer la perception et l'évaluation de la taille des ouvertures. Les résultats montrent toutefois que c'est exactement le contraire et qu'il était en fait généralement plus facile de donner des réponses plus proches de la largeur des épaules/largeur maximale du corps, lorsque la scène ne comportait aucune indication de taille (peut-être en se concentrant trop sur les objets et pas sur la porte). Cela pourrait résulter du fait que, dans un environnement avec des indications de taille, le sujet est soumis à de nombreuses entrées visuelles sur lesquelles il peut se concentrer et qu'il n'en choisit que certaines sans regarder l'ensemble. Cette focalisation sur quelques détails pourrait donc être trompeuse pour les sujets et les amener à donner des réponses plus grandes que leur largeur réelle. En outre, un autre problème qui pourrait intervenir ici pourrait être la familiarité avec les objets de la scène. En effet, comme nous l'avons vu dans l'étude menée par Park et al (2021), le type d'information visuelles auquel est soumis le sujet exerce une grande influence sur ce que sera la perception des distances et des grandeurs dans le monde virtuel. Cette étude a montré que si les sujets étaient plus familiers avec les objets de la scène visuelle, leurs réponses étaient meilleures que dans une scène avec des objets non familiers. Dans notre scène avec indications de taille, les sujets se trouvaient dans un park avec des arbres, un banc, deux lampadaires, la rue et un chariot de

glaces. Rappelons que l'œil humain, pour percevoir la distance, peut utiliser des indices fournis par des dimensions familières et, à partir de ceux-ci, juger de la taille et de la distance de l'environnement (Goldstein, 2010). Il se pourrait donc que dans notre cas, les sujets ne se sentaient pas trop familiers avec les objets présentés dans le park et donc que les informations fournies par ces derniers entraînent une plus grande difficulté à percevoir les tailles dans la scène et donc des réponses plus précises. Il pourrait alors s'agir d'un problème lié à l'interprétation du stimulus visuel présenté. Par conséquent, il pourrait être intéressant d'effectuer des études où différents environnements sont comparés avec des indices visuels sur les magnitudes afin de comprendre si les objets présentés dans la scène exercent une influence sur les réponses données ou non.

## 5 Conclusion

Le principal enjeu de ce travail était de déterminer si la perception et l'évaluation de l'espace et des interactions possibles dans l'environnement virtuel sont identiques ou similaires à ce qui se passe dans le monde réel. Plus précisément, l'objectif était de vérifier si la distance et la nature de la scène visuelle exerçaient une influence significative sur la performance d'une tâche d'évaluation des affordances dans l'environnement virtuel. Les résultats ont montré que la distance a un effet sur cette évaluation. En effet, nous avons constaté que la distance avait un effet sur la performance de la tâche d'affordance. Nous avons vu qu'à courte distance, il semble plus facile de donner une réponse plus proche de la largeur des épaules ou de la largeur maximale du corps. Cela signifie que le rapport entre la largeur de l'ouverture et la largeur maximale du corps/des épaules était plus petit lorsque les personnes regardaient l'ouverture depuis une distance plus courte que depuis une distance plus éloignée. De plus, dans cette première analyse, il a été constaté que la présence ou l'absence d'indices de taille de scène n'apportait pas de changement significatif sur les résultats obtenus. Cependant, cela changeait si la nature de la scène visuelle était liée à la même distance de porte. Dans ce cas, il s'est avéré que le rapport entre la largeur de l'ouverture et la largeur maximale du corps/des épaules était plus petit lorsque les personnes expérimentaient la scène dans un environnement sans indication de la taille de la scène.

Ces résultats nous ont donc permis de remarquer que tant la distance que la nature de la scène visuelle exerçaient une influence significative sur la réalisation d'une tâche d'évaluation de l'affordance dans l'environnement virtuel. Le résultat sur la distance est en accord avec les derniers travaux sur les technologies de réalité augmentée. En effet, même dans ce cas, il est plus facile de faire des considérations plus précises lorsque la porte est vue de près plutôt que de loin.

En ce qui concerne la nature de la scène visuelle, en revanche, nous avons trouvé un résultat opposé à ce que prétendent les études récentes. Il devrait être plus facile, en effet, de donner des réponses plus précises lorsque la porte se trouve dans un environnement avec des indications de magnitude que dans un environnement vide. Ce résultat soulève de nombreuses questions qui pourraient trouver une réponse dans de futures recherches plus approfondies sur cette variable spécifique. Dans des travaux futurs, des comparaisons de plusieurs environnements virtuels différents pourraient être effectuées afin de comprendre si la nature de la scène présentée exerce réellement une influence significative sur la performance d'une tâche d'évaluation d'affordance dans un environnement virtuel.

La contribution de mon travail à la science est donc une condition préalable à tout travail futur dans le domaine de la réalité virtuelle, car, bien que cette technologie soit largement utilisée

dans divers domaines de la vie quotidienne, il est apparu que de nombreuses questions n'ont toujours pas de réponse précise et totalement claire. Grâce à de nouvelles connaissances plus spécifiques, nous pourrions disposer à l'avenir de technologies de pointe de plus en plus proches du monde réel et utilisables dans une multitude de domaines.

## Bibliographie

- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5 ed.). Washington, DC: Amer Psychiatric Pub Inc. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Armbrüster, C., Wolter, M., Kuhlen, T., Spijkers, W. & Fimm, B. (2008). Depth Perception in Virtual Reality: Distance Estimations in Peri- and Extrapersonal Space. *CyberPsychology & Behavior*, 11(1), 9-15. <https://doi.org/10.1089/cpb.2007.9935>
- Audiffren, J. & Bresciani, J. P. (2022). Model Based or Model Free? Comparing Adaptive Methods for Estimating Thresholds in Neuroscience. *Neural Computation*, 34(2), 338-359. [https://doi.org/10.1162/neco\\_a\\_01461](https://doi.org/10.1162/neco_a_01461)
- Bhargava, A., Lucaites, K. M., Hartman, L. S., Solini, H., Bertrand, J. W., Robb, A. C., Pagano, C. C. & Babu, S. V. (2020). Revisiting affordance perception in contemporary virtual reality. 24, 713–724. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00432-y>
- Bhargava, A., Solini, H., Lucaites, K., Bertrand, J. W., Robb, A., Pagano, C. C. & Babu, S. V. (2020). Comparative Evaluation of Viewing and Self-Representation on Passability Affordances to a Realistic Sliding Doorway in Real and Immersive Virtual Environments. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 519-528. <https://doi.org/10.1109/vr46266.2020.00073>
- Bohil, C. J., Alicea, B. & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci*, 12, 752–762. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Braunstein, M. L. (2006). Depth Perception. In *Encyclopedia of Cognitive Science* (p. 1-5). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470018860.s00515>
- Brenner, E. & Smeets, J. B. (2018). Depth Perception. In J. T. Wixted, *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience* (p. 1-30). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119170174.epcn209>
- Bryson, S. (1995). Approaches to the successful design and implementation of VR applications. *Virtual reality applications*, 3-15.
- Coelho, T., de Oliveira, R., Cardoso, T. & Rybarczyk, Y. (2014). Body Ownership of Virtual Avatars: An Affordance Approach of Telepresence. In Y. Rybarczyk, T. Cardoso, J. Rosas & L. M. Camarinha-Matos, *Innovative and Creative Developments in Multimodal Interaction Systems* (Vol. 425, p. 3-19). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55143-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55143-7_1)

- Condino, S., Carbone, M., Piazza, R. Ferrari, M. & Ferrari, V. (2020) Perceptual limits of optical see-through visors for augmented reality guidance of manual tasks. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(2), 411-419. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2914517>
- Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29(1), 27-36. <https://doi.org/10.3758/BF03200563>
- Cutting, J. E. & Vishton, P. M. (1995). Perceiving Layout and Knowing Distances: The Integration, Relative Potency, and Contextual Use of Different Information about Depth. In E. W. & R. S., *Perception of Space and Motion, Handbook of Perception and Cognition* (p. 69-117). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012240530-3/50005-5>
- de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia*, 48(3), 669–680. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.022>
- Decety, J. & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? *Behavioural Brain Research*, 72(1-2), 127–134. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(96\)00141-6](https://doi.org/10.1016/0166-4328(96)00141-6)
- Gadsby, S. (2017). Distorted body representations in anorexia nervosa. *Consciousness and Cognition*, 51, 17-33. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.02.015>
- Gadsby, S. & Williams, D. (2018). Action, affordances, and anorexia: body representation and basic cognition. *Synthese*, 195(12), 5297-5317. <https://doi.org/10.1007/s11229-018-1843-3>
- Gagnon, H. C., Na, D., Heiner, K., Stefanucci, J., Creem-Regehr, S. & Bodenheimer, B. (2020). Judgments of Passing Through Augmented Reality Apertures: The Role of Viewing Distance and Feedback. *Journal of Vision*, 20(11), 262. <https://doi.org/10.1167/jov.20.11.262>
- Geuss, M., Stefanucci, J., Creem-Regehr, S. & Thompson, W. B. (2010). Can I Pass?: Using Affordances to Measure Perceived Size in Virtual Environments. *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, 61-64. <https://doi.org/10.1145/1836248.1836259>
- Gibson, J. J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49(3), 182-194. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1958.tb00656.x>
- Gibson, J. J. (2014). *The ecological approach to visual perception*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315740218>
- Goldstein, E. B. (2010). *Sensation and Perception* (8th ed.). Wadsworth Cengage Learning.

- Goldstein, E. B. & Cacciamani, L. (2021). *Sensation & Perception*. Cengage Learning.
- Guardia, D., Conversy, L., Jardri, R., Lafargue, G., Thomas, P., Dodin, V., Cottencin, O. & Luyat, M. (2012). Imagining One's Own and Someone Else's Body Actions: Dissociation in Anorexia Nervosa. *PloS ONE*, 7(8), e43241. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043241>
- Guardia, D., Lafargue, G., Thomas, P., Dodin, V., Cottencin, O. & Luyat, M. (2010). Anticipation of body-scaled action is modified in anorexia nervosa. *Neuropsychologia*, 48(13), 3961–3966. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.004>
- Guardia, D., Metral, M., Pigeyre, M., Bauwens, I., Cottencin, O. & Luyat, M. (2013). Body distortions after massive weight loss: lack of updating of the body schema hypothesis. *Eat Weight Disord*, 18, 333-336. <https://doi.org/10.1007/s40519-013-0032-0>
- Halekoh, U. & Højsgaard, S. (2014). A kenward-roger approximation and parametric bootstrap methods for tests in linear mixed models—the R package pbrtest. *Journal of Statistical Software*, 59, 1-32. <https://doi.org/10.18637/jss.v059.i09>
- Hoffman, D. M., Akeley, K. & Banks, M. S. (2008). Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3), 1-30. <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- Interrante, V., Anderson, L. & Ries, B. (2004). An experimental investigation of distance perception in real vs. immersive virtual environments via direct blind walking in a high-fidelity model of the same room. *Proceedings of the 1st symposium on applied perception in graphics and visualization*, 162. <https://doi.org/10.1145/1012551.1012584>
- Keizer, A., Smeets, M. A., Dijkerman, H. C., Uzunbajakau, S. A., van Elburg, A. & Postma, A. (2013). Too Fat to Fit through the Door: First Evidence for Disturbed Body-Scaled Action in Anorexia Nervosa during Locomotion. *PLoS ONE*, 8(5), e64602. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064602>
- Keizer, A., van Elburg, A., Helms, R. & Dijkerman, H. C. (2016). A Virtual Reality Full Body Illusion Improves Body Image Disturbance in Anorexia Nervosa. *PloS ONE*, 11(10), e0163921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163921>
- Longo, M. R. (2015). Implicit and Explicit Body Representations. *European Psychologist*, 20(1), 6-15. <https://doi.org/10.1027/1016-9040/a000198>
- Michaels, C. F. & Carello, C. (1981). *Perception, Direct*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Mölbart, S. C., Klein, L., Thaler, A., Mohler, B. J., Brozzo, C., Martus, P., Karnath, H., Zipfel, S. & Giel, K. E. (2017). Depictive and metric body size estimation in anorexia nervosa



- and bulimia nervosa: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Psychology Review*, 57, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2017.08.005>
- Naceri, A., Chellali, R. & Hoinville, T. (2011). Depth Perception Within Peripersonal Space Using Head-Mounted Display. *Presence: Teleoperators and Virtual Environment*, 20(3), 254-272. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00048](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00048)
- Park, H., Faghihi, N., Dixit, M., Vaid, J. & McNamara, A. (2021). Judgments of Object Size and Distance across Different Virtual Reality Environments: A Preliminary Study. *Applied Sciences*, 11(23), 1-15. <https://doi.org/10.3390/app112311510>
- Peillard, E., Argelaguet, F., Normand, J-M., Lécuyer, A. & Moreau, G. (2019). Studying exocentric distance perception in optical see-through augmented reality. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 115-122. <https://doi.org/10.1109/IS-MAR.2019.00-13>
- Peli, E. (1995). Real vision & virtual reality. *Optics and Photonics News*, 6(7), 28-34. <https://doi.org/10.1364/OPN.6.7.000028>
- Pitron, V., Alsmith, A. & de Vignemont, F. (2018). How do the body schema and the body image interact? *Consciousness and Cognition*, 65, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.08.007>
- Preston, C. & Ehrsson, H. H. (2014). Illusory Changes in Body Size Modulate Body Satisfaction in a Way That Is Related to Non-Clinical Eating Disorder Psychopathology. *PLoS ONE*, 9(1), e85773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085773>
- Renner, R. S., Velichkovsky, B. M. & Helmert, J. R. (2013). The Perception of Egocentric Distances in Virtual Environments - A Review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 46(2), 1-40. <https://doi.org/10.1145/2543581.2543590>
- Riva, G. (2014). Out of my real body: cognitive neuroscience meets eating disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(236), 1-20. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00236>
- Skrzypek, S., Wehmeier, P. M. & Remschmidt, H. (2001). Body image assessment using body size estimation in recent studies on anorexia nervosa. A brief review. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 10(4), 215-221. <https://doi.org/10.1007/s007870170010>
- Slade, P. (1988). Body image in anorexia. *British Journal of Psychiatry*, 153(2), 20-22. <https://doi.org/10.1192/S0007125000298930>
- Somers, S. (2017). Geometry-based Affordances. *CogSci*, 3221-3226.
- Vienne, C., Masfrand, S., Bourdin, C. & Vercher, J. (2020). Depth Perception in Virtual Reality Systems: Effect of Screen Distance, Environment Richness and Display Factors. *IEEE Access*, 8, 29099-29110. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972122>

- Wann, J. P., Rushton, S. & Mon-Williams, M. (1995). Natural Problems for Stereoscopic Depth Perception in Virtual Environments. *Vision Research*, 35(19), 2731-2736.  
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00018-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00018-U)
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(5), 683-703.  
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.10.5.683>
- Warren, W. H. & Whang, S. (1987). Visual Guidance of Walking Through Apertures: Body-Scaled Information for Affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 371-383. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.371>
- Witmer, B. G. & Sadowski, W. J. (1998). Nonvisually Guided Locomotion to a Previously Viewed Target in Real and Virtual Environments. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40(3), 478-488.  
<https://doi.org/10.1518/001872098779591340>
- Zheng, J. M., Chan, K. W. & Gibson, I. (1998). Virtual reality. *IEEE Potentials*, 17(2), 20-23.  
<http://dx.doi.org/10.1109/45.666641>