

THÈSE DE DOCTORAT
**Immersion Visuelle Hyper-Réaliste et
Multi-Sensorielle 3D**

RÉSUMÉ

La thèse « Immersion visuelle hyper-réaliste et multi-sensorielle 3D » a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE établi entre les Arts et Métiers d'une part et Renault SAS d'autre part. Elle propose un modèle de score permettant d'évaluer objectivement de la capacité d'un système d'affichage immersif à reproduire le bon niveau de stimulation sensorielle pour un utilisateur, par rapport à ce qu'il recevrait dans la réalité et à la modélisation du système visuel humain.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à poser les bases du modèle : celui-ci est composé de douze critères, répartis équitablement en une somme d'indices de vision et d'indices d'immersion. Chaque critère se voit attribuer, dans la mesure du possible, une note de 0 à 100. La note de 0 représente l'incapacité du système visuel à percevoir ou à utiliser les informations visuelles, tandis que la note de 100 incarne la capacité maximale. Une note de 80 est également assignée pour la performance standard. Chaque critère se voit assigner une pondération en fonction de la tâche réalisée en environnement virtuel.

Nous réalisons dans un second temps une série d'expérimentations afin de compléter les informations disponibles dans la littérature, pour l'établissement des critères. On s'intéresse plus particulièrement au contraste et à la latence. La première expérimentation consiste en la transposition et la validation d'un modèle de performance visuelle en Réalité Virtuelle. Dans la seconde, on compare les effets de la latence sur une tâche donnée, entre un simulateur de type CAVE et un casque de Réalité Virtuelle.

La thèse propose un certain nombre de résultats tant théoriques et méthodologiques qu'expérimentaux. En condition d'immersion virtuelle, les critères de contraste et de luminance sont importants pour la perception visuelle. Les expériences réalisées montrent qu'un modèle adapté aux conditions d'immersion virtuelle est nécessaire. Par ailleurs, on montre que des seuils d'influence de la latence sur la performance semblent exister. On vérifie également la pertinence de corrélations entre performance, présence et mal du simulateur, en fonction de la latence et du système immersif.

ABSTRACT

The thesis "Hyperrealistic and multi-sensorial 3D visual immersion" was carried out within the framework of a CIFRE contract established between Arts et Métiers on the one hand and Renault SAS on the other. It proposes a score model to objectively evaluate the ability of an immersive display system to reproduce the right level of sensory stimulation for a user, compared to what he would receive in reality and to the modeling of the human visual system.

First, we were interested in laying the foundations of the model : it is composed of twelve criteria, equitably divided into a sum of vision indices and immersion indices. Each criterion is given, as far as possible, a score from 0 to 100. A score of 0 represents the visual system's inability to perceive or use visual information, while a score of 100 represents maximum capacity. A score of 80 is also assigned for standard performance. Each criterion is assigned a weight according to the task performed in the virtual environment.

We then carry out a series of experiments to complete the information available in the literature, to establish the criteria. Contrast and latency are of particular interest. The first experiment consists in the transposition and validation of a visual performance model in Virtual Reality. In the second, we compare the effects of latency on a given task, between a CAVE simulator and a HMD.

The thesis proposes a number of theoretical, methodological and experimental results. In virtual immersion conditions, contrast and luminance criteria are important for visual perception. Experiments show that a model adapted to virtual immersion conditions is necessary. Furthermore, we show that thresholds of latency influence on performance seem to exist. The relevance of correlations between simulator performance, presence and cyber-sickness is also checked, depending on the latency and the immersive system.

REMERCIEMENTS

Tarifs pour apparaitre dans les remerciements :

- Citation générale dans un groupe : gratuit.
- Citation nominale : 5 euros.
- Paragraphe personnel : 15 euros.
- Photo personnelle avec des cœurs : 106 euros.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1
I Expérimentation : latence	3
Introduction	4
1 Contexte	5
1.1 Définition et mesure des effets de la latence	5
1.1.1 Définitions	5
1.1.2 La performance comme outil de mesure	6
1.2 Perception de la latence	7
1.2.1 Notions de psychométrie	7

1.2.2	Dans la littérature	8
1.3	Mesure de la latence	9
2	Mise en place du dispositif expérimental	13
2.1	Tâche à effectuer	13
2.1.1	Moyens immersifs	14
2.1.2	Détail de la tâche	14
2.1.3	Mesures	17
2.2	Ajout de latence artificielle	18
2.2.1	Dans le casque	18
2.2.2	Dans le CAVE	19
2.3	Mesures préliminaires	19
3	Conclusions expérimentales	21
3.1	Résultats	21
3.1.1	Dans le CAVE	21
3.1.2	Dans le casque	23
3.1.3	Analyse croisée	26
3.2	Apport au score de réalisme	28
	Conclusion	29
	Discussion générale et perspectives	30
	Bibliographie	32

TABLE DES FIGURES

1.1	Méthode du pendule pour le calcul de la latence.	10
1.2	Méthode de la table tournante pour le calcul de la latence.	11
1.3	Méthode des gradients pour le calcul de la latence.	11
2.1	Oculus Rift et ses accessoires.	15
2.2	Environnement virtuel pour l'expérimentation sur la latence.	16
2.3	Précisions en X et Y pour l'expérimentation sur la latence.	17
2.4	Technique de mesure de la latence.	20
3.1	Précision moyenne sur x et sur y dans le CAVE, en fonction de la latence. . .	22
3.2	Temps de complétion moyens dans le CAVE, en fonction de la latence. . . .	23
3.3	Précision moyenne sur x et sur y dans le casque, en fonction de la latence. . .	25
3.4	Temps de complétion moyens dans le casque, en fonction de la latence. . . .	25
3.5	Scores moyens des questionnaires de propension à l'immersion (QPI) et de présence (QEP).	28

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Mesures de latence (en ms) pour le casque et le CAVE.	16
3.1	Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le CAVE. . .	22
3.2	Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le casque. .	24
3.3	Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le casque. .	27

INTRODUCTION GÉNÉRALE

LES travaux de la thèse « Immersion visuelle hyper-réaliste et multi-sensorielle 3D », dont les résultats sont présentés ici, ont été réalisés dans le cadre d'un contrat CIFRE établi entre les Arts et Métiers et Renault, au sein du laboratoire commun LIV. Ils sont le fruit d'un travail de trois ans, réalisé en grande partie au Technocentre Renault à Guyancourt, sous l'encadrement de Stéphane Régnier, expert maquette virtuelle pour l'ingénierie et le design ; Frédéric Mérienne, professeur aux Arts et Métiers et directeur de l'Institut Image ; et Andras Kemeny, expert-leader simulation immersive et réalité virtuelle.

Renault, fabricant français de voitures bien connu, investit de plus en plus de moyens dans la réalité virtuelle, et même depuis peu, dans la réalité augmentée. Ces technologies viennent compléter les outils de développement des nouveaux véhicules. Ils permettent de tester, d'afficher ou de rouler sans avoir besoin de passer par des prototypes physiques et dans les conditions que l'on souhaite (brouillard, nuit, pluie, ...). Ces procédés permettent de nombreux gains de temps et d'argent, composantes vitales pour l'entreprise.

L'Institut Image, institut de recherche rattaché aux centre Arts et Métiers de Cluny, a quant à lui pour objectifs le développement d'outils et de méthodes pour l'immersion virtuelle au service de l'ingénieur. Ses missions sont celles de la formation, de la recherche et de l'innovation. Dans le but de collaborer à des projets industriels concrets, Renault et les Arts et Métiers, via l'Institut Image, créent en 2011 un laboratoire commun : le LIV (Laboratoire d'Immersion Virtuelle). C'est dans le cadre de ce partenariat qu'à lieu la présente thèse.

Notre étude est née de la volonté de Renault d'offrir à ses équipes des moyens sûrs, permettant la prise de décisions parfois stratégiques, sans craindre un biais causé par la technique. Les outils de travail doivent proposer des situations les plus fidèles à la réalité possible, c'est à dire « réalistes ». L'objectif de la thèse est donc de formuler ce qu'est le réalisme et de quel manière il peut être atteint ou réalisé. Si le sujet peut sembler un

peu large initialement, nous concentrons nos efforts sur la partie matérielle des moyens immersifs, avec en priorité ceux disponibles dans le laboratoire commun. Renault s'associe donc avec un partenaire universitaire et c'est ici qu'entre en jeu la spécificité d'un contrat de type CIFRE : les travaux ont une vocation universitaire, c'est à dire qu'ils sont appelés à être communiqués, publiés ; mais ils possèdent également une réelle vocation applicative, avec des attendus concrets de la part de l'entreprise, qui peuvent être confidentiels. Il est alors dévolu au doctorant de trouver le juste équilibre entre les attentes des deux parties.

Le manuscrit est présenté en cinq grandes parties : deux parties à dominante théorique, une partie modélisation puis deux parties expérimentales.

La première partie présente la synthèse de l'état de l'Art qui a été effectué afin de comprendre en profondeur les différents mécanismes et modélisations qui prennent part au fonctionnement de l'œil, de la vision, et des premières phases de la perception visuelle.

La deuxième partie s'intéresse spécifiquement aux modèles de vision et retrace la première approche qui a été envisagée, puis abandonnée, pour la thèse.

Ensuite, la troisième partie présente la proposition de modèle au cœur de nos travaux : ses objectifs, sa mise en place et ses différentes composantes.

D'abord très théorique, la thèse se dirige ensuite vers deux segments plus expérimentaux. Dans la quatrième partie, on décrit la traduction et l'implémentation d'un modèle de performance visuelle, en réalité virtuelle.

Enfin, dans la cinquième et dernière partie, on s'intéresse à la latence, ses effets sur la performance et l'expérience utilisateur, en comparant deux moyens immersifs.

Première partie

Expérimentation : latence

INTRODUCTION

Dans cette deuxième partie expérimentale on s'intéresse cette fois à la latence. Il est important de définir d'entrée ce que l'on entend par « latence » car il peut co-exister de nombreuses définitions [Blade & Padgett, 2015; Papadakis *et al.*, 2011; Watson *et al.*, 1998]. Nous utiliserons ici la plus commune et la plus générale : la latence « end-to-end », c'est à dire la latence globale de « bout en bout ». Celle-ci correspond au temps (en général en millisecondes) qui s'écoule entre un mouvement réel dans un environnement immersif (que ce soit de la tête, de la main ou de tout autre objet tant que celui-ci est tracké) et l'affichage du mouvement en question sur le/s écran/s de l'environnement immersif. Évidemment, dans notre cas, c'est la latence liée au mouvement de la tête que nous allons évaluer.

L'objectif est ici d'alimenter le critère de latence de notre modèle en informations sur la répercussion que peut avoir la latence sur le système visuel directement mais également de manière plus globale sur l'immersion, la présence et l'expérience utilisateur. Ces informations pourraient nous permettre d'établir des guidelines pour améliorer autant que possible l'expérience utilisateur dans les systèmes immersifs.

A la différence de la partie précédente, nous ne chercherons pas à valider un modèle déjà existant. Il existe des valeurs de seuil pour la latence (que nous décrirons dans le chapitre suivant) bien que difficiles à atteindre dans le cadre d'expérimentation écologiques (la lourdeur de la scène graphique, la complexité du système ou le nombre d'intermédiaires sont autant de paramètres dégradant la réactivité du système). Cependant, de manière analogue à la partie précédente, l'axe de la performance est privilégié pour observer le plus objectivement possible l'influence de la latence sur le système visuel humain au sens large.

Cette partie décrit donc l'expérimentation qui a été menée, sur deux systèmes immersifs différents, dans un contexte de tâche similaire à ce que l'on pourrait exécuter dans la vie de tous les jours, avec des conditions de latence variables.

CHAPITRE

1

CONTEXTE

Dans ce chapitre, on aborde toutes les notions préliminaires à un travail expérimental : la définition du sujet, les valeurs clefs, les méthodes de mesure. On établit également les objectifs que l'on cherchera à atteindre via expérimentation.

1.1 Définition et mesure des effets de la latence

1.1.1 Définitions

Il existe un certain nombre de définitions différentes de la latence. On a présenté notre approche dans la partie sur le score de réalisme. Indépendamment, les auteurs donnent souvent des définitions multiples. On présente ici deux définitions plutôt classiques de la latence (ou plutôt « des » latences) ainsi qu'une définition plus originale.

La première définition est quadruple [Papadakis *et al.*, 2011]. La latence peut, selon ces auteurs, être définie telle que :

- le retard entre l'action d'un utilisateur et sa prise en compte par le système,
- le temps de calcul lié à l'application, typiquement la lourdeur des graphismes à afficher ou des algorithmes qui travaillent en arrière plan.
- le retard dû au temps mis pour afficher l'image calculée, qui est au minimum égal au taux de rafraîchissement de l'écran,
- le retard engendré par la non-synchronisation écran - unité de calcul : une image calculée doit attendre le prochain rafraîchissement de l'écran pour être affichée.

D'autres auteurs, [Blade & Padgett, 2015], proposent quand à eux une version différente, plus adaptée à la Réalité Virtuelle et à l'immersion. Ils définissent alors la latence comme :

- le retard entre un mouvement de l'utilisateur et la réponse du système de tracking (typiquement, l'envoi de l'information de la nouvelle position à l'ordinateur),
- le retard entre le mouvement de l'utilisateur et le même mouvement dans le programme,
- de manière générale, un temps de réponse retardé.

On s'aperçoit que si la première définition est sensiblement la même que pour les auteurs précédents, les autres définitions ne convergent pas du tout. Il nous faut donc impérativement clairement définir le concept de latence que l'on utilise pour notre expérimentation. En l'occurrence, on choisit de se mettre dans le cadre de la deuxième définition de [Blade & Padgett, 2015] : le retard entre le mouvement réel et le mouvement dans la simulation.

Enfin, [Watson *et al.*, 1998], parle quant à lui non pas de latence directement mais d'un concept plus global : la réactivité du système, c'est à dire du temps qui s'écoule lorsque l'on effectue une action, pour recevoir un feedback. La réactivité du système se compose des éléments suivants : la latence en elle-même (sans plus de définition), le temps entre deux images affichées (l'inverse du taux de rafraichissement donc) ainsi que le délai entre l'action de l'utilisateur et le moment suivant où le système rafraichit les acquisitions. Typiquement, si le système de tracking capture les mouvements toutes les 100 *ms* mais que l'utilisateur commence son mouvement 20 *ms* après une capture, il y aura donc automatiquement un délai de 80 *ms* qui s'ajoutera, indépendamment du reste du système.

1.1.2 La performance comme outil de mesure

De nombreux auteurs ont travaillé sur l'influence de la latence. Afin de s'extraire le plus possible de la subjectivité humaine, il fallait trouver une méthode qui ne se repose sur aucun questionnaire, source de biais. L'approche utilisée est alors la performance à l'échelle d'une tâche à réaliser dans l'environnement virtuel. L'influence de la latence sur la performance a été traitée de nombreuses fois dans la littérature [Ellis *et al.*, 1999; Mania *et al.*, 2004; Meehan *et al.*, 2003; Papadakis *et al.*, 2011; Watson *et al.*, 1998], et il a été démontré que la performance varie de manière inverse par rapport à la latence : plus cette dernière augmente, plus la performance en est affectée. C'est notamment par le biais de la mesure de performance que nous mèneront notre expérimentation.

Parallèlement, [Meehan *et al.*, 2003] proposent un autre moyen d'établir l'influence de la latence, qui ne passe pas par la performance. Pour rester sur des facteurs objectifs, ils mesurent des facteurs biologiques dans le corps humain directement, tels que le rythme cardiaque et la conductance de la peau (qui augmente avec la transpiration). Avec ces mesures, ils démontrent également et de manière alternative là encore, que la latence a un effet sur la présence : plus la latence est faible, plus la présence est forte.

1.2 Perception de la latence

1.2.1 Notions de psychométrie

L'étude de la littérature nécessite, au préalable, un petit détour par le domaine de la psychométrie et la définition d'un certain nombre de grandeurs que l'on sera amené à rencontrer. On se contentera ici d'une brève introduction pour la compréhension puisque l'on ne cherchera pas à monter une expérimentation purement psychométrique. Dans ce domaine, les ouvrages de référence restent le Manuel Pratique de Psychophysique de [Bonnet, 1986] pour la langue française et Psychophysics : A Practical Introduction de [Kingdom & Prins, 2010] pour la langue anglaise.

La psychométrie est l'étude quantitative de la relation entre un phénomène physique quantifiable et la ou les réponses générées par le système sensoriel humain. Elle permet d'établir des modèles de fonctionnement à plusieurs niveaux : la structure du stimulus, le fonctionnement perceptif, ou bien le/s processus d'élaboration des réponses sensorielles. La notion de stimulus est définie chez [Bonnet, 1986] telle que :

Ensemble des événements physiques qui déclenchent l'activité des récepteurs sensoriels et étant ainsi à l'origine des réponses observées.

Une notion fondamentale en psychométrie est celle de seuil, c'est à dire de limite établie entre deux états : l'état haut et l'état bas. Selon la tâche effectuée, l'état haut peut être une détection de stimulus, une discrimination, une reconnaissance, une identification, ... tandis que l'état bas sera toujours défini comme l'absence d'état haut. Trois hypothèses sont nécessaires à la reconnaissance d'un seuil :

- **Hypothèse 1** : il ne doit pas être attribué au stimulus de part dans la variation observée des réponses (c'est à dire que le stimulus est considéré comme parfait et le récepteur comme observant des lois de probabilité),
- **Hypothèse 2** : il est admis un continuum des états d'excitation en réponse (c'est à dire que le comportement du système sensoriel ne doit pas changer du tout au tout au passage du seuil),
- **Hypothèse 3** : il est admis l'existence d'un mécanisme de réponse qui peut être modélisé sous la forme d'une règle logique.

On note plus particulièrement deux seuils caractéristiques qui nous intéressent : le seuil de détection et le seuil de discrimination.

Le premier, appelé seuil de détection ou « absolute threshold » en anglais, caractérise la détection du stimulus, c'est à dire la capacité du sujet à répondre sur la présence ou l'absence de ce dernier. Il est nécessaire mais non suffisant pour déterminer en entier un système sensoriel : il faudrait également pouvoir en estimer la limite supérieure. Cependant, et dans de nombreux cas, il est difficile de faire des mesures expérimentales au delà

d'une certaine intensité de stimulus sans endommager le système sensoriel des sujets. Typiquement, une luminance trop forte détruirait les cellules de la rétine dans l'œil. Ces grandeurs dont on ne peut pas mesurer le seuil maximal sont appelées « métathétique » [Stevens, 1957].

Le deuxième seuil caractéristique est celui de discrimination (ou JND en anglais pour « just noticeable difference »). Il quantifie la capacité du sujet à distinguer une présence ou une absence de différence entre deux stimuli. Tout système, physique ou biologique, peut être caractérisé d'une part par ses limites de fonctionnement mais aussi par son pouvoir de résolution, sa capacité à discriminer deux niveaux voisins de signaux qu'il traite.

La psychométrie propose ensuite des paradigmes pour établir des protocoles expérimentaux et des méthodes pour traiter les résultats et en extraire des modèles (avec notamment l'usage des fonctions psychométriques). Néanmoins, nous n'avons pas eu recours à ces méthodes pendant nos expérimentations et le développer serait donc légèrement hors-cadre. On présente donc dans la section suivante les différents seuils et influences sur l'expérience utilisateur liés à la latence, décrits dans la littérature.

1.2.2 Dans la littérature

Il est tout d'abord à noter que la perception de la latence se ferait de manière indirecte [Adelstein *et al.*, 2003] : elle serait perçue non pas directement pas les systèmes sensoriels mais par son effet sur l'environnement. On parle alors d'une forme analogue d'« oscilopsie » [Allison *et al.*, 2001], c'est à dire que l'environnement semble bouger, flotter dans l'espace. On peut donc extrapoler que, plus l'environnement est immersif, plus la resenti de la latence sera fort. La perception est également indépendante de la complexité de la scène [Mania *et al.*, 2004] : que l'on soit dans un décors minimaliste avec quelques polygones ou une scène surchargée, si les deux scènes ont la même quantité de latence, le ressenti sera le même. Enfin, la latence ne suivrait pas la loi de Weber [Adelstein *et al.*, 2003] qui implique que le seuil de perception est proportionnel à la valeur de l'intensité du stimulus : on percevrait donc également la même variation de latence, quelle que soit la valeur initiale de celle-ci.

Le seuil de perception, donc de capacité à dire si le stimulus est présent ou non, a été mesuré à hauteur d'un intervalle de 15 à 18.6 *ms* [Regan *et al.*, 1999]. Néanmoins, ces valeurs ont été observées pour un environnement souvent non-immersif et, comme on a pu le voir au paragraphe précédent, ce dernier paramètre pourrait avoir une forte influence sur le résultat. De même, les résultats peuvent fortement varier suivant si la tâche demandée pendant l'expérimentation demande de se concentrer sur la perception de la latence ou de se concentrer sur une autre activité. Par ailleurs, [Brooks, 1999] estime le seuil de perception, pour les simulateurs de vol (donc sans concentration sur la latence elle-même), à une valeur de 50 *ms*. Regan *et al.* estiment également que le retard spécifiquement imputable au calcul de l'image (sans prise en compte ni de l'acquisition du mouvement, ni de l'affichage) est perceptible à partir de 15 ± 3 *ms*.

Le seuil de discrimination (capacité à distinguer une différence entre deux stimuli) quant à lui, est mesuré pour la main à une valeur comprise entre 15 et 20 *ms* et monte à une valeur de 50 *ms* pour la tête [Ellis *et al.*, 1999]. De leur côté, [Adelstein *et al.*, 2003] et [Mania

et al., 2004] proposent des valeurs pour le tracking de la tête plus proches des valeurs de Ellis pour le tracking de la main avec respectivement 13.6 ± 0.6 ms ($Max = 24.6$ ms) et 9.1 ± 1.6 ms de JND.

Enfin, [Allison *et al.*, 2001] font une remarque intéressante : plus le mouvement de la tête est rapide, plus la latence doit être faible. Ils proposent des valeurs assez élevées comme seuil de perception mais l'ordre de grandeur permet toutefois la comparaison : pour une rotation lente de la tête, une latence de 320 ms est acceptable, tandis que pour une rotation rapide, le seuil descend à 180 ms. Ces valeurs correspondent bien à la théorie de perception indirecte de la latence : plus on bouge vite, plus l'environnement va « flotter » et donc plus la perception sera forte. Cela donne également des indices sur une stratégie à adopter : quand la latence augmente, il peut être bienvenu de ralentir ses mouvements.

1.3 Mesure de la latence

On a vu que la mesure de l'influence de la latence sur l'être humain se faisait généralement via un indice de performance sur une tâche donnée. Il faut également être capable de mesurer le plus précisément possible quel est le niveau de latence auquel la tâche s'effectue. Cette fois, la mesure ne peut être qu'objective puisqu'elle n'implique pas le sujet humain mais seulement le système directement. On trouve un certain nombre de techniques dans la littérature, que nous allons présenter ici brièvement (de manière non exhaustive).

Une première méthode pour déterminer la latence d'un système est décrite chez [Liang *et al.*, 1991] et implique l'utilisation d'un pendule, d'un pendule fixe, d'une caméra, d'un module de tracking (ici, « Isotrack ») et d'un écran de retour (Fig. 1.1). La technique revient à faire osciller un pendule devant une base fixée verticalement (type fil à plomb). Un système de tracking est associé au pendule et affiche, via l'écran de retour, ses mesures horodatées de position du pendule. Avec une caméra placée dans l'axe des pendules on peut, en analysant la vidéo image par image, mesurer l'écart de temps entre l'image montrant l'alignement entre les deux pendules et la mesure indiquant effectivement que le pendule est aligné avec la référence fixe.

[Jacoby *et al.*, 1996] utilisent également un pendule mais sans traitement vidéo a posteriori qui peut être un facteur d'imprécisions si la fréquence de capture d'image est trop basse (on risque de ne pas avoir l'image qui montre l'alignement parfait mais celle avec quelques degrés de plus ou de moins). Dans ce protocole, un ordinateur affiche une scène d'environ 1000 polygones non texturés et est relié à un système émetteur-receveur infrarouge. Le pendule coupe le rayon infrarouge à un certain point de sa course, ce qui a pour effet d'envoyer un ordre vers l'ordinateur qui doit modifier la couleur de certains de ces polygones. Un photodétecteur surveille en permanence l'écran et envoie un signal en tension lorsqu'il détecte le changement de couleur sur l'écran. Le système infrarouge et le photodétecteur sont tous deux cablés sur un oscilloscope qui permet de mesurer avec précision le temps entre leurs signaux respectifs.

Parallèlement, il existe d'autres techniques qui ont été mises au point et qui n'impliquent pas de pendule et de mouvement oscillatoire. [Swindells *et al.*, 2000] génèrent un mouvement cyclique et périodique à l'aide de la table tournante d'un lecteur de vinyles. Un patch

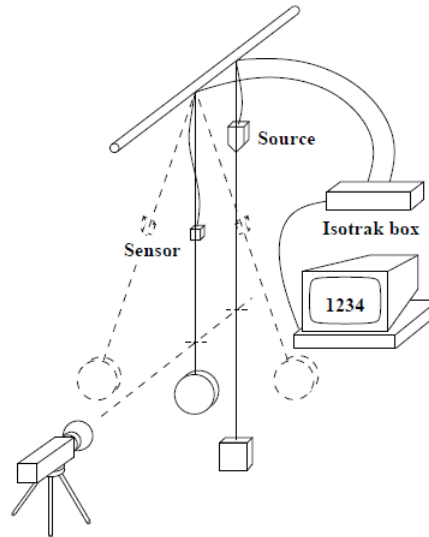


FIGURE 1.1 – Méthode du pendule pour le calcul de la latence.
Image tirée de [Liang *et al.*, 1991]

de forme ronde est placé et tracké sur la table tournante. Son mouvement est reproduit dans une scène virtuelle (Fig. 1.2). L'écart angulaire est mesuré entre le disque réel et le disque virtuel via des prises photo ou vidéo. La vitesse de rotation étant fixée et connue, on peut alors déduire le temps de latence généré par le système.

[Steed, 2008] proposent une autre méthode de pendule tracké, annoncée plus simple que les précédentes. Une diode électroluminescente rouge est fixée à un pendule et trackée grâce à un système optique. Le mouvement de la diode rouge est reproduit en vert sur un écran placé derrière le pendule tandis qu'une caméra filme l'ensemble. A partir de la vidéo, on peut être en mesure de reproduire les sinusoides que décrivent les mouvements des diodes réelle et virtuelle et ainsi en déduire la latence du système en prenant le temps crête à crête.

Si les méthodes décrites jusqu'à présent sont très abstraites par rapport au déroulement réel d'une application en VR, [Di Luca, 2010] propose une technique adaptative : que ce soit pour des lunettes 3D, pour un objet quelconque ou pour un casque de Réalité Virtuelle. La méthode nécessite deux photodétecteurs : le premier placé sur l'objet à tracker et le second au niveau de l'écran qui servira à afficher l'image pour le sujet : dans le cas d'un casque, les deux photorécepteurs seront placés sur le même objet (mais à des positions différents) alors que dans le cas d'un CAVE, les photorécepteurs seront distants (l'un sur les lunettes, l'autre au niveau d'un écran). On affiche, devant le premier photorécepteur (celui sur l'objet tracké), l'image fixe d'un gradient lumineux (un dégradé du noir vers le blanc typiquement). Si on déplace l'objet tracké dans le sens du gradient, on pourra obtenir l'équivalent de sa « position » via la valeur de luminosité qu'il mesure. De l'autre côté, le deuxième photodétecteur est dirigé vers l'écran destiné à l'utilisateur, sur lequel on affiche une nuance de gris (uniforme sur tout l'écran) en fonction des informations de tracking que l'on reçoit. En comparant le temps auquel le photorécepteur passe devant une nuance de gris donnée (en se déplaçant le long du gradient) et le temps où l'écran de l'utilisateur affiche cette même nuance de gris, on obtient la latence globale du système.

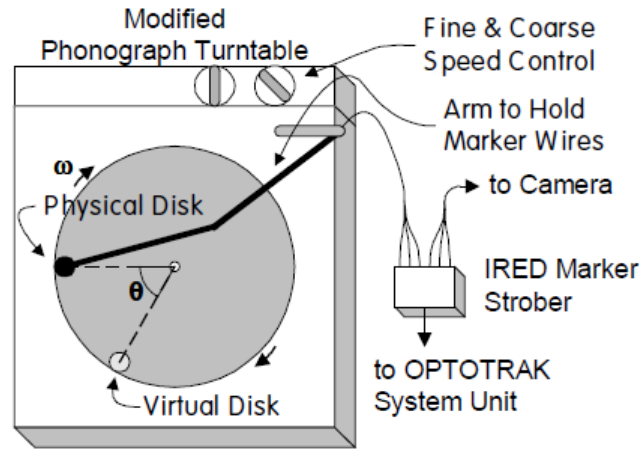


FIGURE 1.2 – Méthode de la table tournante pour le calcul de la latence. Image tirée de [Swindells *et al.*, 2000]. La position du disque physique est appliquée au disque dans la scène virtuelle. Les deux images sont superposées et on mesure l'écart angulaire entre les deux. A partir de la vitesse de rotation on peut remonter à la latence.

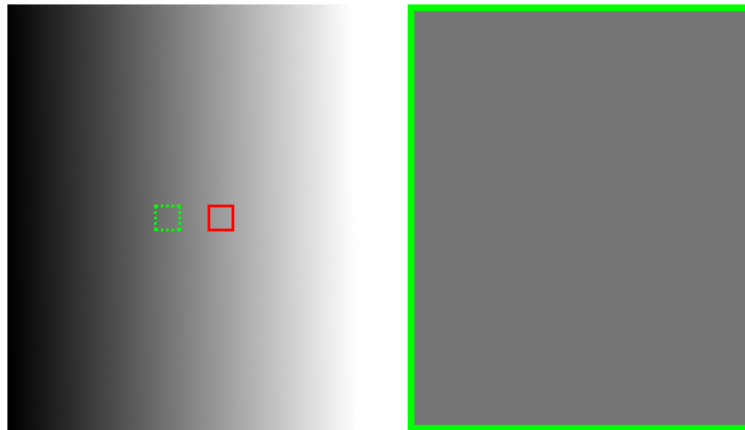


FIGURE 1.3 – Méthode des gradients pour le calcul de la latence. Le cadre rouge représente la zone réellement mesurée par le photorécepteur tandis que le grand cadre vert montre la couleur affichée par l'écran final, ce qui correspond à une « position » sur le gradient fixe représentée par le cadre vert en pointillés. La différence entre les deux petits cadres permet de calculer la latence du système.

Néanmoins, les méthodes impliquant des pendules ont un défaut majeur : les 6 axes de mouvements sont autorisés, ce qui donne un mouvement avec une composante fondamentale et des petites composantes harmoniques. Ces dernières peuvent influencer sur le résultat final en augmentant subrepticement l'amplitude du mouvement par rapport à la théorie. Pour minimiser ces effets indésirables, [Papadakis *et al.*, 2011] proposent donc une méthode similaire au plateau tournant, avec un système limité à 3 degrés de liberté dont 2 fixés. Une rotation est générée avec un servo-moteur et contrôlée avec un encodeur, le tout relié à un oscilloscope. L'environnement virtuel lit les valeurs de l'encodeur et est programmé de telle manière que, lorsque certains seuils de rotation sont franchis, il affiche un changement graphique (un carré de couleur blanche devient noir et inversement). Une photodiode placée au niveau de l'écran surveille ce carré et renvoie un signal à l'oscilloscope en cas de changement. Le reste de la scène virtuelle est un environnement lourd en polygones (environ 140000) et soumis à des calculs de lumière complexes afin de se rapprocher des usages normaux. On relève enfin la mesure de la latence sur l'oscilloscope avec le temps entre le passage de seuil au niveau de l'encodeur, et le changement de couleur au niveau de la photodiode.

Bien que, dans l'idéal et pour maximiser la précision dans les mesures, il faudrait utiliser un oscilloscope, nous utiliserons pour notre expérimentation une méthode par la vidéo semblable à celle proposée par [Steed, 2008], pour mesurer la latence de nos propres systèmes ; la précision étant suffisante pour notre application (voir chapitre suivant).

CHAPITRE

2

MISE EN PLACE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

On connaît maintenant mieux le contexte de la latence dans la Réalité Virtuelle. On pourra donc utiliser ces connaissances pour la planification et la réalisation d'une expérimentation. Si on connaît les seuils de perception et de discrimination de la latence, la variation de la performance n'est pas décrite : on sait simplement qu'elle est impactée par la latence. Il pourrait également être intéressant de se pencher sur la différence d'influence de la latence par rapport au système immersif en lui même. On fixe donc un certain nombre d'objectifs pour cette expérimentation :

- Développer un des critères prépondérant du modèle de score de réalisme.
- Observer l'influence de la latence sur la performance, en milieu immersif.
- Comparer entre deux moyens immersifs (un casque et un simulateur type CAVE).
- Déterminer un seuil au delà duquel l'expérience utilisateur devient trop impactée.

On présente dans ce chapitre la mise en place de notre expérimentation : l'établissement du protocole pour les sujets, les techniques mises au point pour mener à bien les différentes modalités et les mesures préliminaires nécessaires au bon fonctionnement de la manipulation.

2.1 Tâche à effectuer

Les sujets étaient confrontés à une situation écologique, c'est à dire sensée représenter la vie « réelle », et il leur était demandé de réaliser une tâche de tous les jours telle que

regarder à des endroits précis dans le cockpit d'une voiture, pendant de courts laps de temps.

2.1.1 Moyens immersifs

Un des objectifs de l'expérimentation étant de faire également une comparaison entre plusieurs moyens immersifs, on fait passer nos sujets dans un casque de Réalité Virtuelle (un Oculus Rift) et dans un simulateur de type CAVE.

Le CAVE est le même que pour les précédentes expérimentations : que ce soit pour le contraste et la luminance ou pour la conduite suivie de questionnaires. Les sujets sont donc assis dans un CAVE 4 faces à 1 mètre de distance de la face principale (avant). Les sujets n'étaient pas assis sur un siège de voiture comme dans nos autres expérimentations mais sur un siège normal. Ce changement est dû à plusieurs raisons : premièrement, aucune tâche de conduite n'était nécessaire, ensuite, pour garder la continuité avec la chaise de même format utilisée pendant les essais dans le casque, et enfin, pour des facilités de manœuvre. Les sujets n'étaient donc équipés que des lunettes de stéréoscopie et d'une manette de jeu faisant office d'interface de contrôle. Du point de vue des performances graphiques, l'application utilisée pendant l'expérimentation tournait à une valeur constante de 60 images par seconde.

La partie casque de Réalité Virtuelle s'appuyait sur un Oculus Rift de type CV1 (Commercial Version 1, voir Fig. 2.1). L'utilisation du casque se faisait assis à une table disposée dans un des coins du CAVE, hors de vue d'un sujet passant dans le simulateur. L'assise se faisait au moyen d'une chaise parfaitement identique à la première pour assurer une continuité entre les deux. La caméra de tracking était placée sur la table, cette dernière servant aussi pour la réponse aux différents questionnaires (voir ensuite). De cette manière, les sujets pouvaient enchaîner les deux moyens immersifs sans coupure. En terme de performances, l'application était stabilisée à 90 images par seconde.

L'environnement virtuel était commun au CAVE et au casque : le sujet était assis au volant d'une voiture (modèle « officiel » interne Renault), à l'arrêt dans un « paysage » constitué de l'intérieur des bâtiments de Renault. Le paysage était réalisé au moyen d'une photo 360 degrés pour un maximum de photo-réalisme et pour limiter le nombre de triangles à afficher dans la scène (déjà bien chargée par le modèle de la voiture). Les lumières et réflexions des miroirs étaient pré-calculées pour limiter au maximum l'impact sur le temps de calcul des images.

2.1.2 Détail de la tâche

Une fois correctement installés dans l'environnement immersif, derrière de volant virtuel, les sujets pouvaient déclencher le début de la séquence de mesure. Il leur était alors demandé de viser visuellement des endroits précis (des « cibles ») dans la voiture, dans un ordre aléatoire, aussi rapidement et précisément que possible. La visée était aidée avec un réticule semblable à ce qui se fait dans les jeux vidéo, attaché au mouvement de la tête (voir le viseur rouge, Fig. 2.2). Les cibles à viser étaient indiquées par une flèche blanche



FIGURE 2.1 – Oculus Rift et ses accessoires.

De gauche à droite : la caméra permettant de tracker le casque, le casque vu de face (version CV1) et la manette de Xbox associée.

pointant une direction parmi 4 possibles (à gauche, à droite, en haut et en bas). Chaque direction de la flèche était associée à une cible : vers la gauche pour le rétroviseur gauche, vers la droite pour le rétroviseur droit, vers le haut pour le rétroviseur central et vers le bas pour la console centrale (l'écran tactile), voir Fig. 2.2.

Aussitôt que les sujets estimaient être au centre de la cible désignée, ils devaient appuyer sur un bouton (toujours le même) sur une manette de jeu (voir Fig. 2.1) qu'ils tenaient entre leurs mains. Chaque séquence dans le casque ou dans le CAVE était composée de 24 cibles à viser successivement (6 fois chacune des 4 cibles, mélangé aléatoirement). Les sujets devaient replacer leur réticule (et par conséquent la position de leur tête) à une position neutre après chaque visée : à l'endroit d'apparition de la flèche blanche.

A chaque fois que les sujets appuyaient sur la manette et qu'ils étaient (par la biais du réticule) dans la cible désignée, le programme déclenchait une série de mesures (temps de passage, précision sur les axes vertical et horizontal, ...) qui sont décrites plus précisément dans la section suivante. Dans le cas d'un appui sur la manette sans cible désignée, en dehors de toute cible ou sur la mauvaise cible, rien ne se passait.

La même séquence de 24 cibles (avec néanmoins un ordre différent puisque celui-ci était tiré aléatoirement au début de chaque séquence) était répétée 6 fois : 4 fois dans le casque et 2 fois dans le CAVE. Là encore, l'ordre de passage était mélangé aléatoirement entre les sujets pour éviter tout biais. Pour éviter de nombreux aller-retours et une re-calibration avant chaque passage, les séquences dans le casque et dans le CAVE étaient groupées : le sujet pouvait commencer aléatoirement par le casque ou par le CAVE, puis les modalités pour chaque équipement étaient vécues dans un ordre aléatoire. La différence entre chaque modalité pour le casque comme le CAVE était la quantité de latence globale par rapport au tracking des mouvements de la tête (d'où la manière de déplacer le réticule).

Les deux premières modalités de latence sont évidemment, pour le CAVE et pour le casque,



FIGURE 2.2 – Environnement virtuel pour l'expérimentation sur la latence. L'image est tirée du point de vue du sujet, la flèche blanche indique la cible à viser (ici, le rétroviseur gauche) tandis que la croix rouge (le viseur) est alignée avec la direction de la tête.

le fonctionnement à leur latence nominale. On ajoute ensuite, pour chacun des deux moyens immersifs, un offset de 60 *ms* de latence. La quantité de latence ajoutée a été choisie en fonction de la littérature, pour être au dessus du seuil de perception et ainsi s'assurer une influence de la latence sur les sujets. Les techniques déployées pour ajouter artificiellement de la latence sont décrites dans une section suivante (Paragraphe 2.2). Les deux dernières modalités de latence sont pour le casque de Réalité Virtuelle : sa latence nominale étant bien moins élevée que celle du CAVE, on peut donc le « ralentir » jusqu'à atteindre les latences nominale et après ajout de latence du CAVE. On se retrouve donc avec 6 expériences différentes de latence (Tab. 2.1).

TABLE 2.1 – Mesures de latence (en *ms*) pour le casque et le CAVE.

Système	Latence	
CAVE	160 <i>ms</i>	latence nominale
CAVE	220 <i>ms</i>	latence dégradée
Oculus Rift	45 <i>ms</i>	latence nominale
Oculus Rift	105 <i>ms</i>	latence dégradée
Oculus Rift	160 <i>ms</i>	latence niveau nominal du CAVE
Oculus Rift	220 <i>ms</i>	latence niveau dégradé du CAVE

Il aura été nécessaire de faire des mesures préliminaires pour déterminer les latences nominales de nos deux systèmes ainsi que vérifier les valeurs des offsets ajoutés. Ces mesures

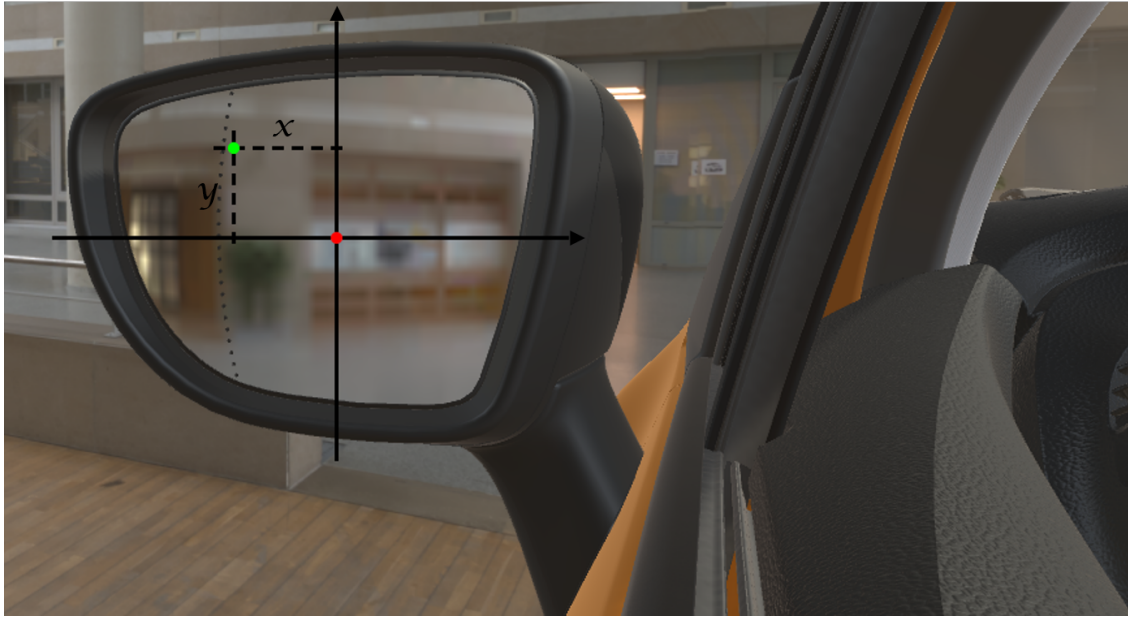


FIGURE 2.3 – Précisions en X et Y pour l'expérimentation sur la latence.
Le point rouge correspond au centre théorique de la cible à viser (ici le rétroviseur gauche) tandis que le point vert représente le point réel que le sujet a visé.

et la méthode mise en œuvre (inspirée des techniques vues précédemment) sont détaillées plus bas (Paragraphe 2.3).

2.1.3 Mesures

Tout au long du passage d'un sujet, un certain nombre de paramètres sont mesurés ou relevés. Certains de manière complètement transparente vis à vis du sujet et donc à priori objectives, d'autres via des questionnaires remplis au fur et à mesure de la session. C'est sur la base de ces données que l'on pourra mener des études statistiques.

Le premier type de mesure concerne le temps global mis pour toucher l'ensemble des cibles, l'ordre des cibles, le temps par cible, et enfin, la précision relative en valeur absolue de la visée. Cette dernière est découpée selon l'axe horizontal (x) et l'axe vertical (y) (voir Fig. 2.3) et est calculée en valeur absolue de manière relative à la taille de la cible : si le sujet arrive à viser précisément le centre de la cible, il obtiendra un résultat de (0,0) alors que s'il vise dans un des angles il obtiendra un résultat de 1 sur les deux axes.

Le sujet est également amené à remplir des questionnaires tout au long de l'expérimentation, avec notamment les questionnaires de propension à l'immersion [Witmer & Singer, 1998], de présence [Witmer & Singer, 1998] et de mal du simulateur de Kennedy (SSQ). Avant de commencer l'expérimentation, tous les sujets commencent par un questionnaire de propension à l'immersion et un questionnaire de mal du simulateur, pour établir leur état « initial ». Après chaque passage dans le casque ou dans le CAVE, les sujets doivent remplir à nouveau un questionnaire de mal du simulateur. Après la meilleure condition (c'est à dire celle qui propose la latence la plus basse, la condition nominale) dans le casque,

les sujets remplissent un questionnaire de présence. De même pour le CAVE. Les questionnaires utilisés étant originellement en anglais, on utilise les versions traduites en français et vérifiées par Bouchard *et al.* [2007, 2009, 2011]. Ces derniers sont disponibles en annexes.

Les questionnaires sont sous-divisés en catégories qui ne nous sont pas toutes utiles. Le questionnaire de cyber-malaise (SSQ) comporte les axes « nausée » et « oculomoteur », que l'on conserve tous les deux car on ne se concentre pas sur un type spécifique de mal du simulateur.

Le questionnaire de propension à l'immersion (ITQ) est divisé en 4 axes : « focus », « implication », « émotions » et « jeu ». On ne conserve que les questions liées aux deux premiers axes car les suivants ne sont pas cohérents avec notre expérimentation.

Enfin, le questionnaire de présence (PQ) est divisé en 7 axes, dont deux optionnels (que l'on marquera d'une astérisque *) : « réalisme », « possibilité d'agir », « qualité de l'interface », « possibilité d'examiner », « auto-évaluation de la performance », et « auditif* », « haptique* ». Encore une fois, on ne garde que les axes cohérents avec l'expérimentation avec notamment ceux sur le réalisme, la possibilité d'agir et l'auto-évaluation de la performance.

2.2 Ajout de latence artificielle

L'ajout de latence artificielle a été déployé de deux manières différentes, pour le casque et le CAVE. Cet écart vient des logiciels utilisés pour afficher l'image dans le CAVE. Un logiciel tierce est employé pour transformer et multiplier les points du vue (un par face du simulateur), logiciel qui recrée sa propre arborescence et son propre système de caméra tandis que l'affichage dans le casque pouvait se faire de manière plus directe avec nos propres paramètres.

2.2.1 Dans le casque

On utilise le SDK de SteamVR pour afficher notre environnement 3D dans le casque de Réalité Virtuelle. Celui-ci utilise des scripts qui à la fois récupèrent les données issues des capteurs (pour suivre le mouvement de la tête) et à la fois calculent les pyramides de vision et la déformation de l'image pour être amenée aux yeux à travers les lentilles. Nous avons essayé dans un premier temps de modifier directement le script de position en y insérant une temporisation entre le moment où les informations des capteurs sont prises, et le moment où elles sont appliquées. Cette méthode ne donnant pas de résultats, nous avons du contourner le problème.

Nous avons donc créé une seconde caméra, paramétrée de manière à pouvoir afficher dans le casque, mais dont la position n'est pas mise à jour avec les informations des capteurs. En lieu et place, nous avons créé notre propre script qui prend la position et la rotation dans l'espace de la première caméra, stocke le tout pendant un temps que l'on spécifie, après

quoi il applique ces données à la seconde caméra. En parallèle, on force la seconde caméra à s'afficher par dessus la première en permanence. On a donc la caméra originelle qui remplit son travail de récupération des informations des capteurs et qui suit parfaitement les mouvements de l'utilisateur mais qui n'est pas affichée, et une deuxième caméra dont on voit les images et qui calque son mouvement, avec du retard, sur la première caméra.

Cette technique nous laisse la plus grande liberté quant au temps maximal de latence que l'on veut ajouter mais est limitée en précision par le frame rate de l'application : la récupération des informations se fait à chaque calcul d'une nouvelle image. Dans notre cas, l'application tournant à 90 images par seconde, l'imprécision moyenne était donc d'une demi-frame, soit 5 *ms*. Au regard des valeurs de latence que l'on ajoute, cela implique un pourcentage d'erreur inférieur à 10% dans la situation la plus critique.

2.2.2 Dans le CAVE

Dans le cas du CAVE, la captation des mouvements de l'utilisateur se fait avec un logiciel extérieur (Dtrack 2, de A.R.T.) qui communique ensuite ses données à l'application qui transpose notre simulation en affichage immersif (MiddleVR). Dtrack permet, via des filtres, une anticipation des mouvements qui sont trackés. Si l'on peut régler la puissance de l'anticipation, on peut également lui donner des valeurs négatives, créant ainsi du retard dans les transmissions des données de position et de rotation. C'est cette méthode que l'on utilise dans le CAVE pour générer de la latence artificielle.

2.3 Mesures préliminaires

Une fois les techniques d'ajout de latence déployées, nous avons mis en œuvre, en nous inspirant de ce qui avait été fait dans la littérature et qui a été présenté précédemment, une technique pour mesurer la latence de nos systèmes de Réalité Virtuelle, en condition d'expérimentation. Cette dernière n'étant de nature psychophysique pure et ne visant pas à déterminer très précisément des seuils, nous nous accommodons d'une technique « moins » précise qu'une technique à l'oscilloscope.

Nous avons donc opté pour un procédé filmé à grande vitesse. La mesure de la latence se faisant ensuite en analysant la vidéo image par image pour déterminer l'écart entre le début d'un mouvement et sa prise en compte et son affichage par le logiciel. On filme à 120 images par seconde avec un smartphone.

L'objectif est donc de mesurer la latence tout en restant dans les mêmes conditions que celles de l'expérimentation. On place donc un objet (un plan) dans l'habitacle de la voiture qui sera chargé d'afficher les variations de l'objet tracké : les lunettes de stéréoscopie pour le CAVE et le masque entier pour le casque. Ce plan se colore en vert lorsqu'il détecte que le mouvement de l'objet tracké est ascendant (c'est à dire lorsque la coordonnée sur l'axe vertical de l'objet tracké supérieure à sa valeur de l'image précédente), et se colore en rouge lorsqu'il détecte l'inverse.

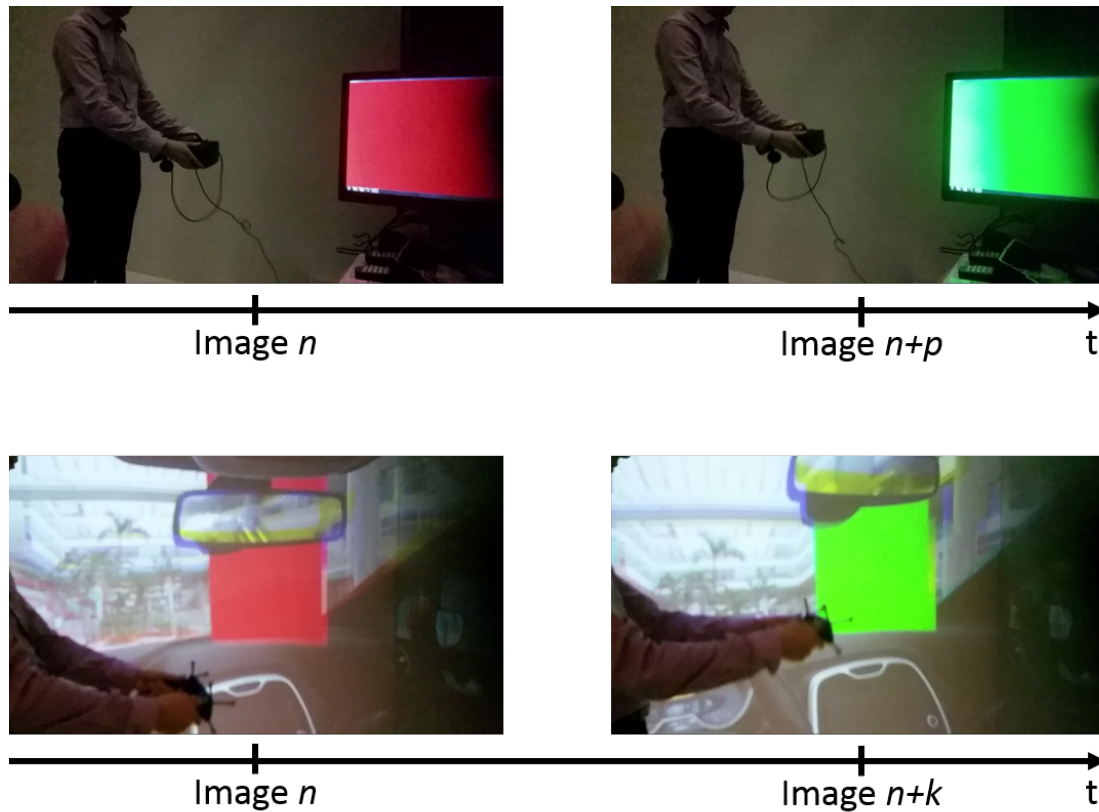


FIGURE 2.4 – Technique de mesure de la latence.

On compte le nombre d'image de la vidéo ralentie entre le début du mouvement (ici, vertical ascendant) et la prise en compte du mouvement par le logiciel, signalée par le passage d'une texture du rouge au vert.

On demande ensuite à une personne d'imprimer verticalement un mouvement sinusoïdal à l'objet tracké et on filme, avec, dans le plan, l'objet bougé et le plan changeant de couleur. On peut donc déterminer visuellement quand est ce que l'opérateur commence un mouvement ascendant ou descendant, puis compter le nombre d'image de la vidéo jusqu'au changement de couleur du plan, signifiant la prise en compte du changement. Plus le nombre d'images entre les deux marqueurs est grand, plus la latence est importante : il s'écoule 8 ms entre chaque image de la vidéo. On peut donc mesurer facilement la latence de nos outils, avec une précision d'une demi-image, soit 4 ms .

Les résultats de nos mesures sont synthétisés en Table 2.1. On peut donc ainsi débiter une campagne de mesure sur des sujets, dont les résultats sont développés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE

3

CONCLUSIONS EXPÉRIMENTALES

Pour notre expérimentation, nous avons réuni 32 sujets, 17 hommes et 15 femmes. 2 sujets parmi les hommes n'ont pas vu leur résultats retenus pour différentes raisons : l'un n'a pas pu faire tous les segments proposés (mal du simulateur trop élevé) tandis que l'autre fermait les yeux pour contrer ce même mal du simulateur. On termine donc avec 30 sujets ayant des données exploitables, à parité homme femme parfaite. Les sujets étaient âgés de 23 à 54 ans, avec un âge moyen de 31 ans (écart-type : $\sigma = 11$ ans).

On présente ici tous les résultats de l'expérimentation, et leurs implications. On traite d'abord séparément le CAVE et le casque, avant de les analyser ensembles. On met enfin en avant les enseignements que l'on peut en retirer pour le critère de latence.

3.1 Résultats

3.1.1 Dans le CAVE

De manière générale, tous les résultats numériques (moyennes et écarts-types) relatif aux modalités dans le CAVE sont résumés en Table 3.1, avec QPI : Questionnaire de propension à l'immersion, QEP : Questionnaire de présence, SSQ : Questionnaire de cyber-malaise, X et Y : précision sur les axes respectifs et t : temps de complétion.

Initialement, les sujets répondent à un questionnaire de propension à l'immersion (moyenne des réponses : 43.83). Après leur passage à la condition nominale du CAVE, les sujets répondent également à un questionnaire de présence (moyenne des réponses : 67.50 ± 11.33 , Fig. 3.5). Il ne semble pas exister ($p = 0.07$) de corrélation statistique² entre les deux qui

2. Méthode : Corrélation de Pearson, 28 degrés de liberté, $Q_{obs} = 1.91$.

TABLE 3.1 – Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le CAVE.

Latence	QPI	QEP	SSQ	X	Y	t
160 ms	43.83	67.50	3.37 ± 3.25	0.18 ± 0.07	0.17 ± 0.08	101.49 ± 14.31
220 ms	± 7.50	± 11.33	4.60 ± 4.91	0.22 ± 0.09	0.19 ± 0.10	128.61 ± 24.79

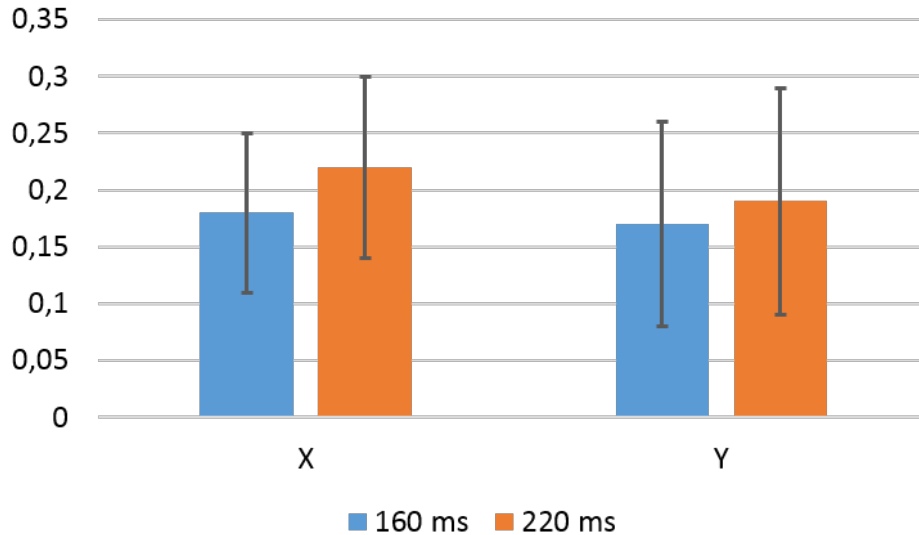


FIGURE 3.1 – Précision moyenne sur x et sur y dans le CAVE, en fonction de la latence.

nous permettrait de prévoir le degré d'immersion d'un sujet sur la base d'un QPI.

A l'issue de chaque passage dans le CAVE, en condition nominale et en condition dégradée de latence, les sujets ont répondu à un questionnaire d'auto-évaluation du cyber-malaise. Celui-ci donne des valeurs moyennes de respectivement 3.37 pour la modalité sans latence ajoutée, et de 4.60 pour la modalité avec latence ; soit une augmentation de 36.5% du cyber-malaise avec la latence. Il existe une corrélation statistique¹ ($p = 0.0003$) positive-forte ($\rho = 0.61$) entre les deux jeux de valeurs : les sujets les plus malades dans la modalité la plus faible en latence, l'étaient encore plus avec l'augmentation de la latence.

Dans le cas du CAVE sans latence ajoutée (Fig. 3.1 et Table 3.1), la précision relative sur les deux axes (horizontal et vertical) est quasiment la même (0.18 contre 0.17). Cet écart s'accroît néanmoins lorsque la latence augmente avec des valeurs moyennes de 0.22 et de 0.19 pour les axes horizontal et vertical respectivement. Le temps de complétion (Fig. 3.2 et Table 3.1) est lui beaucoup plus sensible au changement de latence avec une valeur moyenne entre les sujets qui passe de 101.49 s à 128.61 s pour réaliser l'ensemble de la tâche.

Du point de vue statistique, en utilisant un test de Student pour échantillons appariés (29 degrés de liberté), on montre que la latence influence la performance de manière globale ; que ce soit pour la précision sur l'axe horizontal ($p = 0.00009$), la précision sur l'axe vertical ($p = 0.015$) ou le temps de complétion ($p = 3 \times 10^{-11}$). Néanmoins, le mal du simulateur

1. Méthode : Corrélation de Pearson, 28 degrés de liberté, $Q_{obs} = 4.08$.

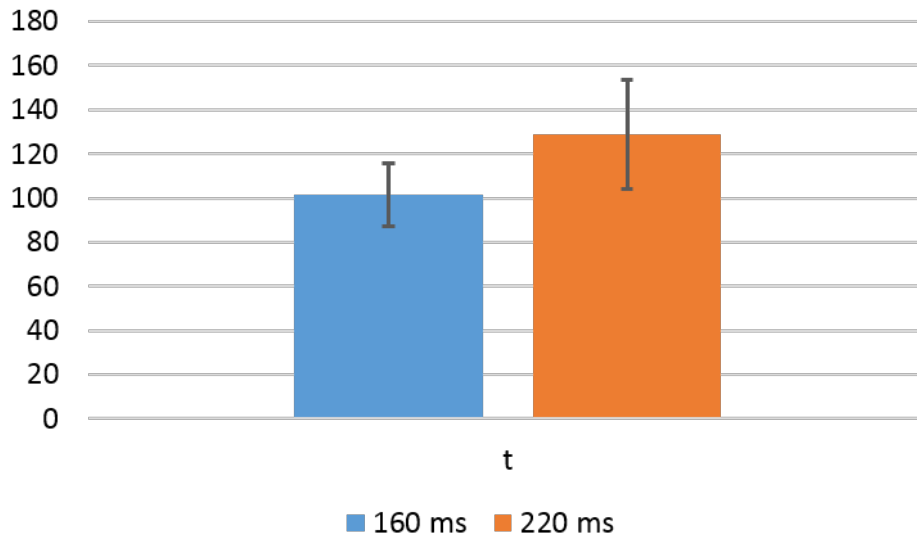


FIGURE 3.2 – Temps de complétion moyens dans le CAVE, en fonction de la latence.

échoue au test statistique avec une p-value de $p = 0.099$. Si les sujets sont gênés par l'évolution de la latence pour viser le centre des cibles, ils sont nettement moins perturbés et ne deviennent pas significativement plus malades.

Dans l'explication de ces résultats, un paramètre dont il faut tenir compte est le critère de vitesse qui a été demandé pour passer l'ensemble des cibles. Maintenir un rythme élevé pendant l'expérience implique moins de soin apporté à la précision de la visée. Par conséquent, nos résultats montrent une moins bonne précision par rapport à ce qui aurait pu être atteint si l'ordre aurait été de simplement viser le centre des cibles. Dans le cas actuel du CAVE, la précision moyenne des sujets au-dessus de la médiane du temps d'achèvement (dans la configuration de latence plus élevée) est supérieure à la précision moyenne des sujets en dessous de la médiane du temps d'achèvement : 0,26 contre 0,21 sur l'axe horizontal et 0,23 contre 0,16 sur l'axe vertical. Par conséquent, outre le temps d'interaction, un rythme plus élevé dans des conditions de latence plus élevées entraîne une plus grande imprécision.

Ces deux modalités dans le CAVE ne sont évidemment pas suffisantes pour tirer des conclusions définitives et il nous reste à explorer les résultats propres au casque qui, plus est, bénéficie de niveaux de latence bien moins élevés, mais aussi la comparaison entre les systèmes immersifs, à latence équivalente.

3.1.2 Dans le casque

De même que précédemment, tous les résultats numériques (moyennes et écarts-types) relatif aux modalités dans le casque sont résumés en Table 3.2. On constate une influence statistique¹ de la latence sur le cyber-malaise ($p < 2 \times 10^{-7}$) et sur toutes les modalités de la performance : précision sur l'axe horizontal ($p = 0.034$), sur l'axe vertical ($p = 0.024$), et

1. Méthode : test de Friedman, 3 paramètres.

le temps de complétion ($p < 8 \times 10^{-10}$).

TABLE 3.2 – Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le casque.

Latence	QPI	QEP	SSQ	X	Y	t
45 ms			3.33 ± 3.27	0.17 ± 0.07	0.15 ± 0.09	87.74 ± 10.40
105 ms	43.83	70.07	4.60 ± 3.68	0.17 ± 0.06	0.18 ± 0.10	92.85 ± 10.58
160 ms	± 7.50	± 10.83	6.23 ± 5.55	0.17 ± 0.07	0.17 ± 0.08	94.73 ± 11.64
220 ms			7.40 ± 5.62	0.19 ± 0.08	0.18 ± 0.09	98.37 ± 11.36

Là encore, après leur passage à la condition nominale de latence, les sujets répondent à un questionnaire de présence (moyenne des réponses : 70.07 ± 10.83 , Fig. 3.5). On compare ces résultats à ceux du questionnaire de propension à l'immersion initialement rempli. Il ne semble là non plus pas exister ($p = 0.31$) de corrélation statistique¹ entre les deux.

On s'intéresse ensuite à la comparaison deux à deux des conditions de latence dans le casque : l'éventail de niveaux de latence étant plus large, on pourra déterminer plus précisément le comportement de la performance en fonction de l'évolution de la latence. Tous les tests réalisés le sont avec la méthode du test de Student pour échantillons appariés (29 degrés de liberté).

Du point de vue de la précision horizontale, la latence n'a statistiquement d'effet ($p = 0.043$) qu'à partir de la 3ème et dernière comparaison deux à deux : entre 105 et 160 ms de latence ajoutée. Les autres confrontations (passage de 0 à 60 ms de latence ajoutée et passage de 60 à 105 ms) ne présentent aucun résultat statistique ($p = 0.90$ et $p = 0.23$ respectivement). On constate néanmoins des différences sur les résultats moyens, à partir de la 3ème décimale.

Pour la précision verticale, la tendance est inverse : statistiquement, la latence a un effet dès la première comparaison ($p = 0.0004$) puis cesse ($p = 0.27$ et $p = 0.20$ pour les deux dernières comparaisons). Il semblerait alors que la performance de visée, dans ce cas particulier de visée rapide avec le mouvement de la tête, varie non-linéairement mais par effet de palier. Les deux mouvements, horizontal et vertical, semblent ne pas avoir la même sensibilité : le premier possède son palier aux alentours des 100 ms de latence ajoutée, tandis que le second se situe autour de 60 ms ajoutées.

Ensuite, le temps de complétion montre une influence statistique de la latence plus erratique que la précision avec des tests validés pour la première ($p = 0.0003$) et la troisième ($p = 0.005$) comparaison, mais pas pour la deuxième ($p = 0.26$).

Enfin, on constate un comportement différent des mesures de précision pour l'évolution du cyber-malaise : ce dernier semble évoluer graduellement en fonction de la latence, là où dans le casque on ne relevait pas d'influence statistique, toutes les confrontations deux à deux présentent des résultats positifs : $p = 0.014$ pour le passage de 0 à 60 ms ajoutées, $p = 0.036$ pour le passage de 60 à 105 ms et $p = 0.067$ pour le dernier passage, bien que la corrélation soit plus faible. Numériquement, on constate une évolution de 38 et 35% dans les deux premiers cas, puis une augmentation de 19% à la fin.

1. Méthode : Corrélation de Pearson, 28 degrés de liberté, $Q_{obs} = 1.03$.

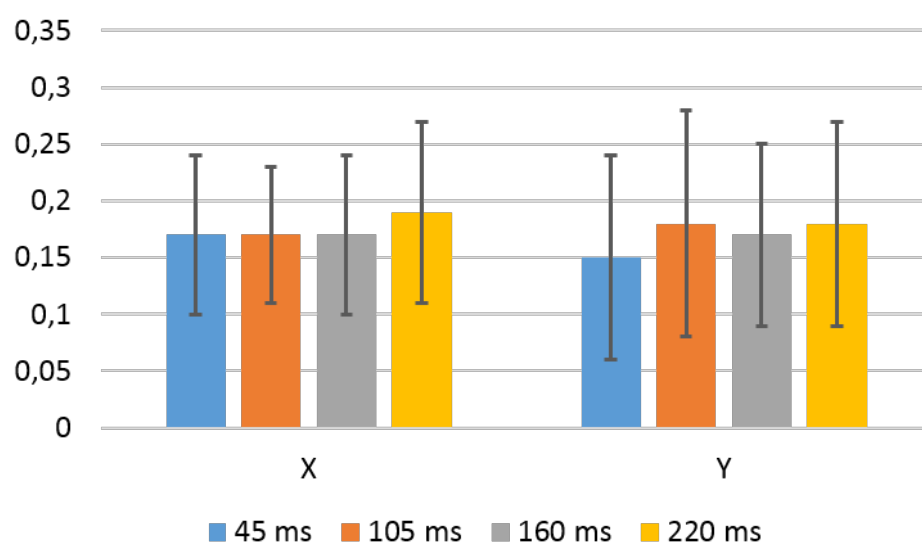


FIGURE 3.3 – Précision moyenne sur x et sur y dans le casque, en fonction de la latence.

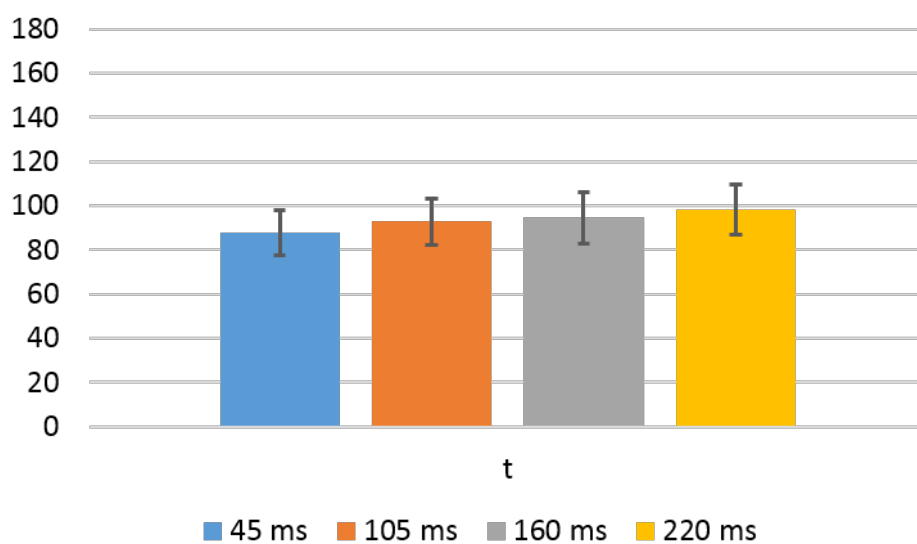


FIGURE 3.4 – Temps de complétion moyens dans le casque, en fonction de la latence.

Plus la vitesse des mouvements de la tête est élevée, plus la latence influence l'expérience de l'utilisateur, tant au niveau de la dégradation de la précision que de l'augmentation du mal des simulateurs. Les sujets étaient confrontés à un choix : soit ils ralentissaient leurs mouvements pour augmenter la précision, soit ils gardaient un bon rythme au détriment de la précision et du mal du simulateur. Les sujets semblent développer leur propre stratégie pour contrer le décalage de la latence, en se basant sur le niveau de cette dernière. Par conséquent, pour assurer la meilleure expérience utilisateur et minimiser le cyber-malaise, il peut être conseillé de suggérer des mouvements petits et lents aux utilisateurs quotidiens des techniques d'immersion.

Maintenant que l'on a détaillé les résultats propres à chaque système et à chaque niveau de latence, on s'intéresse à comparer les systèmes entre eux, lorsqu'ils ont le même niveau de latence et lorsque la latence varie de la même quantité. Au delà des valeurs de performance, on s'intéresse également aux valeurs de présence et de cyber-malaise.

3.1.3 Analyse croisée

Tous les tests statistiques présentés dans cette partie ont été réalisés avec la méthode du test de Student pour échantillons appariés (29 paramètres).

La première comparaison concerne la troisième modalité du casque et la première du CAVE. Dans cette configuration, les deux dispositifs offrent la même quantité de latence (160 ms). Confronter les résultats de nos sujets reviendra alors à regarder l'influence du dispositif immersif sur la tâche à réaliser. Du côté de la précision, on ne trouve aucun résultat statistique ($p = 0.41$ pour l'axe horizontal, $p = 0.79$ pour l'axe vertical) venant étayer l'hypothèse d'une influence du système immersif. Néanmoins, l'influence du changement de système est statistiquement avérée dans le cas du temps de complétion ($p = 0.0006$) avec une augmentation de 7% du temps total nécessaire pour viser les 24 cibles dans le CAVE et dans le cas du cyber-malaise ($p = 0.001$) avec une augmentation de 85% lorsque l'on passe dans le casque !

Dans le cas du casque et du simulateur à 220 ms de latence totale, l'influence statistique ($p = 10^{-10}$) du changement de système sur le temps de complétion est corrélée avec une variation encore plus forte : les sujets sont 30% plus lents pour terminer la séquence de visée dans le CAVE, par rapport au casque. On retrouve encore une fois une influence statistique ($p = 0.015$) sur le mal du simulateur avec une valeur moyenne supérieure de 60% dans le casque par rapport au CAVE. A la différence de la précédente comparaison, il existe cette fois un lien statistique entre le changement de système et la précision de visée sur l'axe horizontal ($p = 0.0006$) avec une valeur 16% plus grande dans le cas du CAVE. L'influence sur la précision sur l'axe vertical est elle toujours non vérifiée par les tests ($p = 0.49$).

Ensuite, on compare encore les deux systèmes immersifs, mais cette fois seulement en terme de variation de performance lorsque l'on augmente la latence de 60 ms. Les moyennes de ces variations sont résumées en Table 3.3. A l'instar de la comparaison casque/CAVE en conditions de latence dégradées, on observe une influence statistique du changement de système combiné à une augmentation de latence de 60 ms sur deux des trois modalités de la performance : sur la précision horizontale ($p = 0.007$) et sur le temps de complé-

tion ($p = 6 \times 10^{-9}$). Cela revient à dire que lorsque l'on change de système, du casque au CAVE, en augmentant la latence, la performance est deux fois perdante : d'abord de par le changement de système, mais également par le changement de latence (plus encore que simplement par un changement de latence).

TABLE 3.3 – Expérimentation latence : résultats moyens et écarts-types dans le casque.

	$\Delta_{60} X$	$\Delta_{60} Y$	$\Delta_{60} t$	$\Delta_{60} SSQ$
Casque	0.001	0.029	5.11	1.27
CAVE	0.039	0.06	27.15	1.23

On observe une forte augmentation des valeurs de cyber-malaise entre toutes les configurations (environ 120% entre les deux modalités dans le CAVE ou les deux cas extrêmes dans le casque, par exemple). Il est à noter que les valeurs moyennes de mal du simulateur pour les versions les plus dégradées en latence sont fortement influencées par des valeurs de cyber-malaise très élevées pour quelques sujets. Cela s'explique par la contribution, en plus du conflit classique vergence-accommodation, du conflit visio-vestibulaire : plus la latence est grande, plus la disparité entre la vision et la conscience du mouvement par le système vestibulaire est importante et donc le mal du simulateur.

Dans le cas du casque, l'effet du conflit visio-vestibulaire est amplifié : les sujets ne voient pas leur corps. Selon nous, ce problème reste le principal facteur de mal du simulateur dans le casque, et la raison de la relative tranquillité dans le CAVE. Dans le simulateur, lorsque l'on tourne la tête, si l'image bouge avec du retard, le cerveau peut se raccrocher au fait d'avoir quand même vu le corps « bouger » (lorsque l'on tourne la tête à droite, si l'on fait abstraction de l'environnement, cela revient à garder la tête fixe en faisant tourner le corps vers la gauche). Le cerveau peut décréter qu'une partie des informations visuelles est incohérente et peut s'en protéger. Dans le casque, néanmoins, le flux visuel est entièrement remplacé et lorsque l'on bouge la tête, on ne peut se référer qu'à nos centrales inertielles et l'image ayant du retard. Le cerveau ne peut pas alors déjuger cette dernière, et le mal du simulateur est plus important.

Enfin, si on a déjà vu dans les deux sections précédentes qu'il ne semble pas être possible d'extrapoler la présence dans le casque ou dans le CAVE à partir de la propension à l'immersion (Fig. 3.5), on vérifie néanmoins l'existence d'une corrélation¹ négative-forte entre la présence et le cyber-malaise vérifiée, pour les deux moyens immersifs (pour le CAVE : $p = 0.022$ avec $\rho = -0.42$; pour le casque : $p = 0.030$ avec $\rho = -0.40$). Bien que cela puisse sembler évident, on a la confirmation que lorsque la présence augmente, le mal du simulateur diminue, et inversement.

Nos résultats montrent une influence statistique de la latence sur la précision. Lorsque la latence augmente, les sujets sont plus imprécis sur les mouvements latéraux que sur les mouvements verticaux. La différence entre les deux axes s'explique par la plus grande amplitude de mouvement nécessaire pour atteindre les cibles gauche et droite (miroirs gauche et droit, entre 40 et 60 degrés) par rapport à l'amplitude nécessaire pour atteindre les cibles supérieure et inférieure (miroir central et affichage central, 15 degrés). Un mouvement plus grand signifie un temps d'interaction plus long avec la latence et donc une plus grande imprécision.

1. Méthode : Corrélation de Pearson, 28 degrés de liberté.

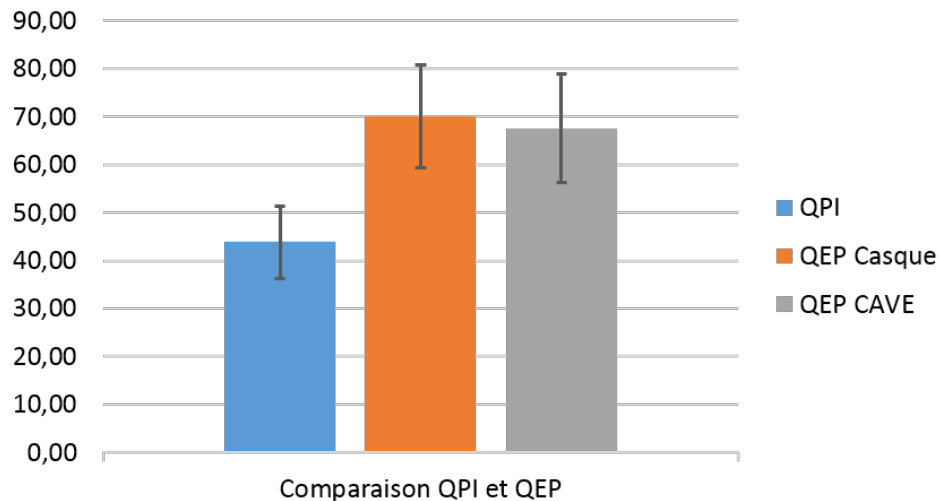


FIGURE 3.5 – Scores moyens des questionnaires de propension à l’immersion (QPI) et de présence (QEP).

3.2 Apport au score de réalisme

On possède désormais un certain nombre de clefs supplémentaires pour la compréhension de la relation entre la latence et l’expérience utilisateur en immersion ; au minimum du point de vue d’une tâche relativement cohérente avec celles que l’on effectue réellement. Outre les seuils de perception de la latence que l’on a vu en introduction de cette partie expérimentale, des valeurs de latence semble se dégager.

Par rapport au fonctionnement de notre système de notation, il semble difficile de ne pas attribuer la note maximale au seuil de perception de la latence, à savoir 15 *ms*. De notre expérimentation, deux seuils de performance semblaient se dégager grâce aux casques : un premier relatif aux mouvements horizontaux entre 105 et 106 *ms* de latence ajoutée, et un deuxième, pour les mouvements verticaux, plus sensible, entre 0 et 60 *ms* de latence ajoutée. De part la valeur nominale de latence du casque, le seuil le plus critique est donc pour une latence totale d’environ 105 *ms*. C’est la valeur que nous retiendrons pour la performance standard dans notre notation.

Néanmoins, notre expérimentation n’a pas permis de mettre en avant un seuil limite au delà duquel la tâche n’était plus réalisable, ce qui complique l’attribution d’une note minimale au critère de latence. En première approche, il peut toutefois être envisagé de l’associer à une latence qui tend vers l’infini.

CONCLUSION

Dans cette seconde partie expérimentale, nous avons cherché à approfondir notre compréhension de la relation entre la latence et l'expérience utilisateur, dans un contexte d'immersion. Nous avons donc confronté des sujets à la même situation dans différents moyens immersifs, à différents niveaux de latence. Notre approche se voulant objective, nous nous sommes orientés vers des mesures de performance pour tirer des conclusions.

Si notre expérimentation confirme certains points de la littérature tels que l'influence de la latence sur la performance, sur le mal du simulateur ou la corrélation entre ce dernier et la présence, elle nous permet également d'apporter notre propres conclusions. D'abord, la variation de la performance semble être non-linéaire et régie par des seuils. Ensuite, ces seuils sont différents suivant les mouvements réalisés : dans la tâche que nous demandions à nos sujets de réaliser, les mouvements verticaux étaient plus sensibles que les mouvements horizontaux. Enfin, et contrairement à la performance, le mal du simulateur semble lui évoluer graduellement avec la latence.

Ces dernières constatations nous permettent donc de mieux caractériser le critère de latence pour le score de réalisme, sans pour autant le valider complètement : d'une part la limite basse de fonctionnement, associée à la note minimale du score, n'a pas pu être dégagée clairement, et d'autre part, les valeurs de seuils sont spécifiques à la nature des instructions données et devraient être confrontées à d'autres mouvements ou situations de vitesse.

DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Avenir ... Aliquam erat volutpat. Aliquam a mattis nunc, et aliquam felis. Etiam et dolor vel odio eleifend porta vel quis turpis. Praesent tincidunt aliquet egestas. Phasellus enim neque, tincidunt ut pretium at, bibendum at lectus. Cras scelerisque, tellus id euismod aliquet, ante elit lobortis velit, in sodales quam enim et sem. Nulla id auctor tellus. Duis vehicula orci ut nisi iaculis scelerisque. Phasellus vitae odio non massa ornare posuere in a felis. Morbi pretium eleifend ipsum, sit amet consequat mauris elementum ac. Aenean hendrerit viverra magna nec bibendum. Nam non ultrices mauris. Etiam dictum turpis et ipsum eleifend, commodo volutpat odio tempus. Nullam eget felis ornare, cursus metus sit amet, ornare justo. Donec sagittis ligula ut leo auctor pretium.

Cras scelerisque, tellus id euismod aliquet, ante elit lobortis velit, in sodales quam enim et sem. Nulla id auctor tellus. Duis vehicula orci ut nisi iaculis scelerisque. Phasellus vitae odio non massa ornare posuere in a felis. Morbi pretium eleifend ipsum, sit amet consequat mauris elementum ac. Aenean hendrerit viverra magna nec bibendum. Nam non ultrices mauris. Etiam dictum turpis et ipsum eleifend, commodo volutpat odio tempus. Nullam eget felis ornare, cursus metus sit amet, ornare justo. Donec sagittis ligula ut leo auctor pretium. Cras scelerisque, tellus id euismod aliquet, ante elit lobortis velit, in sodales quam enim et sem. Nulla id auctor tellus. Duis vehicula orci ut nisi iaculis scelerisque. Phasellus vitae odio non massa ornare posuere in a felis. Morbi pretium eleifend ipsum, sit amet consequat mauris elementum ac. Aenean hendrerit viverra magna nec bibendum. Nam non ultrices mauris. Etiam dictum turpis et ipsum eleifend, commodo volutpat odio tempus. Nullam eget felis ornare, cursus metus sit amet, ornare justo. Donec sagittis ligula ut leo auctor pretium.

Cras scelerisque, tellus id euismod aliquet, ante elit lobortis velit, in sodales quam enim et sem. Nulla id auctor tellus. Duis vehicula orci ut nisi iaculis scelerisque. Phasellus vitae

odio non massa ornare posuere in a felis. Morbi pretium eleifend ipsum, sit amet consequat mauris elementum ac. Aenean hendrerit viverra magna nec bibendum. Nam non ultrices mauris. Etiam dictum turpis et ipsum eleifend, commodo volutpat odio tempus. Nullam eget felis ornare, cursus metus sit amet, ornare justo. Donec sagittis ligula ut leo auctor pretium. Cras scelerisque, tellus id euismod aliquet, ante elit lobortis velit, in sodales quam enim et sem. Nulla id auctor tellus. Duis vehicula orci ut nisi iaculis scelerisque. Phasellus vitae odio non massa ornare posuere in a felis. Morbi pretium eleifend ipsum, sit amet consequat mauris elementum ac. Aenean hendrerit viverra magna nec bibendum. Nam non ultrices mauris. Etiam dictum turpis et ipsum eleifend, commodo volutpat odio tempus. Nullam eget felis ornare, cursus metus sit amet, ornare justo. Donec sagittis ligula ut leo auctor pretium.

On peut imaginer un usage « détourné » pour déterminer la lisibilité d'un simulateur : en pondérant tous les critères liés à cette tâche (acuités, contraste et luminance, fluidité en cas de haute vitesse) et en mettant la pondération des critères « inutiles » à cette tâche à 0.

Autre usage : VRb'n'b

Bibliographie

- Adelstein, Bernard D., Lee, Thomas G., & Ellis, Stephen R. 2003. Head Tracking Latency in Virtual Environments : Psychophysics and a Model. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, **47**(20), 2083–2087.
- Allison, R. S., Harris, L. R., Jenkin, M., Jasiobedzka, U., & Zacher, J. E. 2001 (Mar.). Tolerance of temporal delay in virtual environments. *Pages 247–254 of : Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*.
- Blade, Richard A., & Padgett, Mary Lou. 2015. *Handbook of virtual environments : design, implementation, and applications*. Second edition edn. Human factors and ergonomics. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Bonnet, Claude. 1986. *Manuel Pratique de Psychophysique*. Collection U. Paris : A. Colin.
- Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. 2007. Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. vol. 5.
- Bouchard, S., St-Jacques, J., Renaud, P., & Wiederhold, B. K. 2009. Side effects of imersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, **2**(2), 127–137.
- Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. 2011. Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced sude-effects. *Journal of Computer and Information Technology*, **1**(3), 20–32.
- Brooks, F.P. 1999. What's real about virtual reality? *IEEE Computer Graphics and Applications*, **19**(6), 16–27.
- Di Luca, Massimiliano. 2010. New Method to Measure End-to-End Delay of Virtual Reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **19**(6), 569–584.
- Ellis, S. R., Adelstein, B. D., Baumeler, S., Jense, G. J., & Jacoby, R. H. 1999 (Mar.). Sensor spatial distortion, visual latency, and update rate effects on 3D tracking in virtual environments. *Pages 218–221 of : Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*.
- Jacoby, Richard H., Adelstein, Bernard Dov, & Ellis, Stephen R. 1996. Improved temporal response in virtual environments through system hardware and software reorganization. *Pages 271–285 of : Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, vol. 2653. International Society for Optics and Photonics.
- Kingdom, Frederick, & Prins, Nicolaas. 2010. *Psychophysics : A Practical Introduction*. Boston, MA : Elsevier.
- Liang, Jiandong, Shaw, Chris, & Green, Mark. 1991. On Temporal-spatial Realism in the Virtual Reality Environment. *Pages 19–25 of : Proceedings of the 4th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '91. New York, NY, USA : ACM.
- Mania, Katerina, Adelstein, Bernard D., Ellis, Stephen R., & Hill, Michael I. 2004. Perceptual Sensitivity to Head Tracking Latency in Virtual Environments with Varying Degrees of Scene Complexity. *Pages 39–47 of : Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. APGV '04. New York, NY, USA : ACM.
- Meehan, M., Razzaque, S., Whitton, M. C., & Brooks, F. P. 2003 (Mar.). Effect of latency on presence in stressful virtual environments. *Pages 141–148 of : IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings*.

Papadakis, Giorgos, Mania, Katerina, & Koutroulis, Eftichios. 2011. A System to Measure, Control and Minimize End-to-end Head Tracking Latency in Immersive Simulations. *Pages 581–584 of : Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*. VRCAI '11. New York, NY, USA : ACM.

Regan, Matthew J. P., Miller, Gavin S. P., Rubin, Steven M., & Kogelnik, Chris. 1999. A real-time low-latency hardware light-field renderer. ACM Press.

Steed, Anthony. 2008. A Simple Method for Estimating the Latency of Interactive, Real-time Graphics Simulations. *Pages 123–129 of : Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '08. New York, NY, USA : ACM.

Stevens, S. S. 1957. On the psychophysical law. *Psychological Review*, **64**(3), 153–181.

Swindells, Colin, Dill, John C., & Booth, Kellogg S. 2000. System Lag Tests for Augmented and Virtual Environments. *Pages 161–170 of : Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '00. New York, NY, USA : ACM.

Watson, Benjamin, Walker, Neff, Ribarsky, William, & Spaulding, Victoria. 1998. Effects of Variation in System Responsiveness on User Performance in Virtual Environments. *Human Factors*, **40**(3), 403–414.

Witmer, Bob G., & Singer, Michael J. 1998. Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **7**(3), 225–240.
