



HAL
open science

Étude de la fatigabilité des bras lors d'interactions gestuelles en mid-air au travers de la réalité virtuelle

Vincent Reynaert

► **To cite this version:**

Vincent Reynaert. Étude de la fatigabilité des bras lors d'interactions gestuelles en mid-air au travers de la réalité virtuelle. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Lille, 2021. Français. NNT : 2021LILUB019 . tel-03580555

HAL Id: tel-03580555

<https://theses.hal.science/tel-03580555v1>

Submitted on 18 Feb 2022

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

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

Étude de la Fatigabilité des Bras lors d'Interactions Gestuelles en Mid-air au travers de la Réalité Virtuelle

Thèse de doctorat de l'Université de Lille

École doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur - EDSPI
Spécialité de doctorat : Informatique, IHM, RV
Unité de recherche: CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) - UMR 9189
Réfèrent : Laurent Grisoni
Financement : Europe, Interreg VR4REHAB

Thèse présentée et soutenue publiquement à Villeneuve d'Ascq le 25/11/2021, par

Vincent Reynaert



Composition du jury:

Luigi Lancieri Professeur des Universités, Université de Lille	Président
Dominique Bechmann Professeure des Universités, Université de Strasbourg	Rapporteure
Frédéric Merienne Professeur des Universités, ENSAM	Rapporteur
Valérie Gouranton Maître de conférences, Université de Rennes	Examinatrice
Laurent Grisoni Professeur des Universités, Université de Lille	Directeur
Florent Berthaut Maître de conférences, Université de Lille	Coencadrant

Résumé

Récemment, sont apparus de nouveaux casques grand public de réalité virtuelle (RV) aux capacités comparables à ceux utilisés en laboratoire. L’usage de ces technologies est devenu plus courant et les sessions d’utilisation sont devenues plus longues (jeux vidéo, expression artistique, travail à distance, sport, rééducation...). Durant ces temps d’interaction, les utilisateurs ont leurs bras dans les airs parfois sans repos possible. Aussi, ce type d’interaction dans l’air, qualifié de “mid-air”, est connu pour provoquer de la fatigue au niveau des bras que l’on nomme “effet Bras de Gorille” en interaction humain-machine (IHM). Comprendre ce phénomène pour la conception des applications en RV devient un élément essentiel afin d’assurer un confort d’utilisation et aussi d’éviter des blessures.

D’abord, nous discuterons les travaux antérieurs traitant le sujet des interactions mid-air puis de la fatigue musculaire avant de présenter des études portant sur ces deux sujets. Puis, au travers de plusieurs expériences, nous avons cherché à étendre notre compréhension de cette fatigue lors de divers exercices en RV. En particulier, nous nous sommes intéressés à différentes synchronisations des mains, au rythme et au rapport contrôle-affichage (CDR), en nous appuyant sur les contextes d’applications pouvant occasionner de longues sessions d’utilisations comme le jeu vidéo et l’expression artistique. Premièrement, nous avons étudié les différences entre interactions uni et bi-manuelles en terme de fatigue au cours de différentes tâches répétitives de sélection de cibles. Il est apparu que la synchronisation des mains devait être choisie au regard de la tâche à effectuer pour optimiser le rapport entre fatigue et efficacité. De plus, il semblerait préférable de laisser à l’utilisateur la possibilité d’utiliser ses mains comme il le souhaite afin qu’il auto-régule sa fatigue. En outre, il se pourrait que les changements de postures des utilisateurs soient des indicateurs de la fatigue. Enfin, nous avons pu vérifier que certaines directions de mouvements étaient plus fatigantes, en particulier celles verticale et certaines diagonales. Secondement, suite notamment à l’analyse des retours des participants, nous avons exploré l’impact d’un rythme imposé aux gestes sur la fatigue des bras et l’expérience utilisateur (UX), lors d’un exercice de suivi de cibles. Ce rythme, en particulier, s’il est irrégulier et lent, semblerait pouvoir réduire la sensation de fatigue et améliorer l’expérience utilisateur. De plus, si le rythme est souligné par un son simple, le participant pourrait percevoir la tâche comme étant plus fatigante mais également plus engageante qu’en l’absence de son. Enfin, nous avons voulu observer les effets de variations du CDR sur la fatigue et l’UX. Cette expérience a pris place dans un instrument de musique virtuel immersif (IVMI) afin de motiver les gestes mid-air des participants. Ils ont dû explorer un cube musical alors que leurs gestes étaient visuellement amplifiés ou réduits, plus ou moins fortement. Quand le CDR est modérément modifié, il pourrait avoir un impact bénéfique sur l’UX lors de l’interaction avec un IVMI. Aussi, étonnamment, nous n’avons observé aucun impact significatif sur la fatigue alors que, pour une grande variation du CDR,

les utilisateurs parcouraient moins de distance avec leur main et que cette distance est corrélée à la fatigue. Étudier le CDR sur des temps d'interaction plus longs nous permettra peut-être d'observer un impact sur la fatigue.

En conclusion, nous avons pu retirer des implications sur les choix de conceptions les plus judicieux à effectuer lorsque l'on veut proposer des applications peu fatigantes en RV. Nous avons également proposé des idées de futurs travaux qu'il serait intéressant d'étudier, comme l'utilisation de la manipulation redirigée entre des zones de CDR différenciées ou l'étude des changements de postures comme indicateur de la fatigue.

Abstract

Recently, new virtual reality (VR) headsets for the general public have appeared with capacities comparable to those used in the laboratory. The use of these technologies has become more common, and the user sessions have become longer (video games, artistic expression, remote work, sport, rehabilitation, etc.). During these times of interaction, users have their arms in mid-air sometimes without possible rest. Also, this type of interaction in the air is known to cause fatigue in the arms which is called the “Gorilla Arm effect” in human-computer interaction (HCI). Understanding this phenomenon when we design VR applications, becomes an essential element in order to ensure user comfort and also to avoid injuries.

First, we will discuss previous work dealing with the subject of mid-air interactions and then muscle fatigue before presenting studies that group these two subjects. Then, through several experiments, we sought to extend our understanding of this fatigue during various VR exercises. In particular, we were interested in different synchronizations of the hands, the rhythm and the control-display ratio (CDR), by relying on the contexts of applications that can cause long sessions of use such as video games and artistic expression. First, we studied the differences between one and two-handed interactions in terms of fatigue during different repetitive target selection tasks. It appeared that hand synchronicity had to be chosen with regard to the task to be performed in order to optimize the relationship between fatigue and efficiency. In addition, it would seem preferable to give the user the possibility of using their hands as they wish so that they self-regulate their fatigue. In addition, it could be that changes in user postures are indicators of fatigue. Finally, we were able to verify that certain directions of movement were more tiring, in particular the vertical one and certain diagonals. Second, following in particular the analysis of participants’ feedback, we explored the impact of a rhythm imposed on gestures on arm fatigue and user experience (UX), during a follow-up exercise. of targets. This rhythm, especially if it is irregular and slow, seems to be able to reduce the feeling of tiredness and improve the user experience. In addition, if the rhythm is emphasized by a simple sound, the participant might perceive the task as more tiring but also more engaging than without sound. Finally, we wanted to observe the effects of variations in CDR on fatigue and UX. This experience took place in an immersive virtual musical instrument (IVMI) in order to motivate the mid-air gestures of the participants. They must have explored a musical cube while their gestures were visually amplified or reduced, more or less strongly. When the CDR is moderately modified, it could have a beneficial impact on the UX when interacting with an IVMI. Also, surprisingly, we observed no significant impact on fatigue as, for a large variation in CDR, users covered less distance with their hand and this distance was correlated with fatigue. Studying the CDR over longer interaction times may allow us to observe an impact on fatigue.

In conclusion, we were able to draw some interesting implications for the

best design choices to make when offering low-fatigue VR applications. We also proposed ideas for future work that would be interesting to study, such as the use of manipulation redirected between differentiated CDR areas or the study of posture changes as an indicator of fatigue.

Remerciements

Sans surprise, dans cette section, je vais remercier les différentes personnes ayant participé de près ou de plus loin à la réalisation et au bon déroulement de cette thèse.

Je commencerais en remerciant mon directeur de thèse, Laurent Grisoni, pour son soutien constant et son sang-froid à toute épreuve. Vient ensuite Florent Berthaut qui a co-encadré cette thèse et dont la disponibilité illimitée en parallèle de ses nombreux projets, me fait douter que le temps s'écoule de la même manière dans son univers. Évidemment, je remercie aussi Yosra Rekik, maître de conférence à l'université polytechnique de Valenciennes, pour l'énergie qu'elle a mise à ma disposition afin de me permettre de démarrer au mieux cette épreuve.

En outre, j'aimerais cordialement remercier les membres de mon jury de thèse : Luigi Lancieri qui l'a présidé, Dominique Bechmann et Frédéric Merienne qui ont attentivement lu et fait leur rapport sur ce mémoire et Valérie Gouranton qui a également participé à l'examen de ma soutenance.

Aussi, merci à l'IRCICA pour son accueil ainsi qu'aux membres des équipes Mint et PIRVI avec qui j'ai passé de très bons moments de convivialités lorsque l'on pouvait se rendre aux bureaux.

De plus, cette thèse n'aurait pu se faire sans les nombreux bénévoles - collègues, amis et inconnus - qui ont participé aux nombreuses expérimentations que j'ai menées.

Enfin merci à ma famille pour son soutien sans faille.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Organisation et Contributions	2
2	Interactions Gestuelles et Limites Humaines	5
2.1	Interactions Gestuelles	5
2.1.1	Interaction Humain/Machine	5
2.1.2	Interactions Gestuelles et Mid-Air	6
2.1.3	Réalité Virtuelle	10
2.2	Usages Concrets et Grand Public des Interactions Mid-Air	12
2.3	Limites Humaines	13
2.3.1	Interactions et Limites Cognitives	14
2.3.2	Interactions et Limites Physiques	15
2.4	Fatigue Musculaire des Bras	16
2.4.1	Définition	16
2.4.2	Méthodologies pour Mesurer la Fatigue Musculaire	17
2.4.3	Interactions et Fatigue	19
3	Fatigue et Interactions à Une ou Deux Mains	21
3.1	Introduction	21

TABLE DES MATIÈRES

3.2	État de l'Art : Interactions à Une Main et à Deux Mains	23
3.3	XP1 : Synchronisation Contrôlée sur Tâche Simple	25
3.3.1	Participants	25
3.3.2	Équipement	25
3.3.3	Design	26
3.3.4	Procédure & Tâche	28
3.4	Résultats de l'Expérience 1 - Contrôlée	31
3.4.1	Consensus entre Utilisateurs sur la Fatigue Perçue	31
3.4.2	Performances des Utilisateurs	35
3.4.3	Corrélations entre Performances & Fatigue Perçue	37
3.4.4	Données Qualitatives et Retours Utilisateurs	39
3.5	XP2 : Synchronisation Libre sur Tâche Simple	42
3.6	Résultats de l'Expérience 2 - Libre	42
3.7	Discussion pour les Expériences 1 & 2	45
3.7.1	Fatigue et Interfaces Gestuelles en VR	45
3.7.2	Compromis Performance/Fatigue	47
3.8	XP3 : Synchronisation Contrôlée sur Tâche Composite	48
3.8.1	Participants	49
3.8.2	Design	50
3.8.3	Procédure & Tâche	50
3.9	Résultats de l'Expérience 3 - Contrôlée	52
3.9.1	Consensus entre Utilisateurs sur la Fatigue Perçue	52
3.9.2	Performances des Utilisateurs	56
3.9.3	Corrélations entre Performances & Fatigue Perçue	61
3.9.4	Données Qualitatives et Retours Utilisateurs	61

3.10 XP4: Synchronisation Libre sur Tâche Composite	63
3.11 Résultats de l'Expérience 4 - Libre	64
3.12 Discussion pour les Expériences 3 & 4	67
3.12.1 Fatigue et Interfaces Gestuelles en VR	67
3.12.2 Compromis Performance/Fatigue	69
3.13 Limitations	71
3.14 Conclusion et Travaux Futurs	71
4 Fatigue, UX et Interactions Rythmées	73
4.1 Introduction	73
4.2 État de l'art	74
4.2.1 Musique et fatigue	74
4.2.2 Interaction rythmée	74
4.3 Expérience	75
4.3.1 Participants	75
4.3.2 Design	76
4.3.3 Tâche	77
4.3.4 Procédure	78
4.3.5 Hypothèses	79
4.4 Résultats	80
4.4.1 Performances de l'utilisateur	80
4.4.2 Questionnaire	81
4.4.3 Discussion sur les Résultats de l'Expérimentation	83
4.5 Conclusion	84
5 Fatigue, UX et CDR dans un IVMI	87

TABLE DES MATIÈRES

5.1	Introduction	87
5.2	État de l'Art	88
5.2.1	Control-Display Ratio (CDR)	88
5.2.2	Musique	90
5.2.3	Contribution	91
5.3	Expérience	91
5.3.1	Participants	92
5.3.2	Design	93
5.3.3	Stimuli	94
5.3.4	Procédure	94
5.3.5	Hypothèses	96
5.4	Résultats	96
5.4.1	Questionnaire	96
5.4.2	Distance Parcourue et Corrélation	98
5.4.3	Classement	98
5.4.4	Entretiens et Observations	99
5.5	Discussion	100
5.5.1	Impact du CDR sur le Sentiment de Présence avec les IVMI	100
5.5.2	Impact du CDR sur la Difficulté du Contrôle du Son	101
5.5.3	Impact Potentiel du CDR sur la Fatigue des Utilisateurs	101
5.5.4	Vers un Environnement Musical Virtuel Redirigé	102
5.6	Conclusion	103
6	Conclusion	105
6.1	Discussion Générale	105
6.2	Conseils de Conception	108

6.3	Travaux Futurs	109
6.3.1	Estimateur	109
6.3.2	CDR	110
6.3.3	IVMI Bimanuel	110
6.3.4	Motifs Rythmiques et Complexité Musicale	110
6.4	Mots de la Fin	111
	Bibliographie	112

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures

2.1	Sur la gauche : première souris d'ordinateur [156]. Sur la droite : premier gant de données [181].	6
2.2	Ivan Sutherland 1968 : L'épée de Damoclès.	10
3.1	Un participant assis et complètement équipé avec un casque de RV (le Valve Index) sur la tête, deux manettes de type "Knuckles" en main ainsi que deux HTC Vive Trackers sur les bras.	26
3.2	Les 7 directions utilisées dans nos expériences. Avec en (a) une représentation de ce que peut voir l'utilisateur, en (b) une représentation schématique.	27
3.3	Les deux types de séquences pour la tâche de sélection de cibles avec les différentes conditions de main.	28
3.4	Valeurs moyennes de la fatigue perçue par l'utilisateur du bras droit (a) et du bras gauche (b) mesurées en fonction d'évaluation absolue de la synchronicité des mains (<i>2HT</i> , <i>2HO</i> , <i>1HL</i> et <i>1HR</i>) et les directions du mouvement (FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN et UD).	32
3.5	Expérience 1 – Résultats pour chaque mesures dépendantes.	35
3.6	Illustration schématique des différentes stratégies.	40
3.7	Valeurs pour la fatigue perçue du bras droit et gauche de chaque utilisateur. Par souci de clarté, les valeurs de fatigue du bras gauche sont affichées en valeurs négatives mais sont en réalité positives. . . .	43

TABLE DES FIGURES

3.8 Utilisation des mains : Voici les tracés de l'emplacement de la main par rapport aux 4 cibles. Lorsqu'une main n'est pas dans une cible, elle est considérée comme Out (*i.e.* en dehors de toutes cibles). Les mains étant souvent en dehors des cibles (soit parce que non utilisée soit parce qu'entre deux cibles), nous observons donc une ligne bleu clair (Both) quasiment continue pour le Out. 44

3.9 Les 7 directions que les participants peuvent voir dans l'environnement virtuel pour un petit espacement. De gauche à droite : FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN, UD. 49

3.10 Les deux types de séquences pour la tâche de sélection de cibles avec les différentes conditions de main. 49

3.11 Valeurs moyennes de la fatigue perçue par l'utilisateur pour le bras droit et l'espacement large (a), le bras droit et le petit espacement (b), le bras gauche et le large espacement (c) et le bras gauche et le petit espacement (d) mesurées comme fonction d'évaluation de la synchronisation des mains (*1HR*, *1HL*, *2HA* et *2HS*) et des directions de mouvement (FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN et UD). 53

3.12 Expérience 3 – Résultats pour chaque mesures dépendantes. 57

3.13 Utilisation des mains sur l'intégralité de la durée de l'exercice. 64

3.14 Zoom sur l'utilisation des mains des participants P1, P2, P7, P6, P5 et P4 qui représentent les différentes stratégies : utilisation de 2HS pour P1-Large, de 2HA pour P2-Large, de 1HR pour P7-Large, principalement utilisation de 1HR ou 1HL mais "améliorés" *i.e.* commence l'essai suivant par la ligne qui vient d'être terminée pour P6-Large, technique spéciale où la main passe d'une ligne à l'autre à chaque cible pour P5-Petit et de 2HO alternatif pour P4-Petit 65

3.15 Valeurs pour la fatigue perçue du bras droit et gauche de chaque utilisateurs. Par souci de clarté, les valeurs de fatigue du bras gauche sont affichées en valeurs négatives mais sont en réalité positives. . . . 66

4.1 Montage expérimental. À gauche: participant assis avec un casque RV. Au centre : ce qu'ils ont vu, c'est-à-dire la fenêtre mobile de l'échelle Borg CR10 à gauche, le curseur sphérique au centre et la cible cylindrique avec sa trajectoire. À droite: panneau d'échelle Borg qui est affiché dans la scène. 76

4.2	Déplacement possible de la cible suivant des cordes du cercle dans lequel elle est contrainte.	77
4.3	Résultats pour chacune des mesures dépendantes: (a) Niveau moyen de fatigue des bras par <i>régularité</i> et <i>période de temps</i> , (b) Distance moyenne entre la main et la cible par <i>vitesse</i> et (c) Précision moyenne par <i>régularité</i> , <i>son</i> et <i>vitesse</i>	80
4.4	Résultats pour chacune des mesures dépendantes: (a) Niveau moyen de fatigue du bras à la fin des tâches par <i>son</i> et <i>vitesse</i> , (b) Moyenne du sentiment de présence par <i>son</i> , (c) Moyenne de la difficulté perçue par <i>régularité</i> et <i>vitesse</i> , (d) Moyenne du sentiment de réussite par <i>vitesse</i> , (e) Moyenne de l'impression d'un rythme entraînant par <i>son</i> et (f) Moyenne du sentiment d'utilité du son par <i>régularité</i> , <i>vitesse</i> et <i>son</i>	82
5.1	Montage expérimental. À gauche: participant assis avec un casque RV. Au centre: ce qu'ils ont vu, c'est-à-dire la fenêtre mobile de l'échelle Borg CR10 à gauche, le curseur sphérique au centre et la boîte visuelle avec les marqueurs. À droite: panneau d'échelle Borg qui est affiché dans la scène.	92
5.2	Tailles des boîtes visuelles et gestuelles: (rangée du haut) Grande boîte visuelle (60cm) avec les trois tailles gestuelles (a:60cm, b:40cm, c:20cm), (rangée du bas) Petite boîte visuelle (20cm) avec les trois tailles gestuelles (d:60cm, e:40cm, f:20cm).	93
5.3	Distribution de la présence, de l'entrée et de la distance parcourue par la main pour chaque condition de taille de boîte visuelle × taille de boîte gestuelle. Les boîtes à moustaches donnent la plage médiane et inter-quartile.	97
5.4	Exemple de séquence d'interaction au sein d'un environnement musical virtuel redirigé dans lequel deux zones d'interactions sont définies avec des CDR différents.	102

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

3.1	Descripteurs des mouvements des bras utilisés dans cette étude. NOTE : cet ensemble de descripteurs a été calculé à partir des données brutes de cette expérience qui sont échantillonnées à 90 Hz puis ré-échantillonnées sur des périodes de 15 s	38
3.2	Résultats des corrélations.	38
3.3	Résultats des corrélations.	61
4.1	Questions utilisées pour évaluer l'expérience utilisateur. Pour la fatigue, nous avons utilisé le Borg CR10 [28] et pour les questions restantes, nous avons utilisé des questions sur une échelle de Likert en 7 points (de fortement en désaccord à fortement d'accord).	78
5.1	Questions utilisées pour évaluer l'expérience utilisateur. Pour la fatigue, nous avons utilisé le Borg CR10 [28] et pour les questions restantes, nous avons utilisé des questions sur une échelle de Likert en 7 points (de fortement en désaccord à fortement d'accord).	95

Chapitre 1

Introduction

De nos jours, de nombreux systèmes interactifs tels que de grands écrans tactiles, des contrôleurs de type Wiimote ou plus récemment Joycons, des caméras de profondeur de type Kinect, des casques de réalité virtuelle (RV), etc. se retrouvent un peu partout. Que ce soit dans les musées, la restauration rapide, les jeux vidéo, la santé, le sport, le design industriel, l’expression artistique ou le travail à distance, il n’est plus rare d’avoir à gesticuler devant une machine pour interagir avec elle. Ces gesticulations sont des interactions dites gestuelles et correspondent à des actions comme le pointage d’un bouton sur un grand écran ou la manipulation d’un objet virtuel. Ces interactions nous mènent à avoir les bras levés et/ou tendus face à nous et sont qualifiées de “mid-air”. Sans possibilité de repos, ce type d’interaction, est connu pour provoquer de la fatigue au niveau des bras. En interaction humain-machine (IHM) nous parlons de “l’effet Bras de Gorille” [29, 68, 72, 76, 161, 168] pour qualifier cette fatigue caractérisée par une sensation de lourdeur au niveau des membres supérieurs.

Ce phénomène devient un réel problème puisque la pratique se démocratisant, les utilisations d’applications qui demandent une interaction mid-air pourraient se prolonger et provoquer un inconfort, des troubles musculosquelettiques ou des blessures. C’est d’autant plus vrai pour des cas d’usages comme la rééducation, la pratique artistique en RV ou certains jeux. À tel point que, par exemple, dans le jeu en RV “Beatsaber”, le message d’accueil demande à l’utilisateur de prendre des pauses régulières pendant sa pratique du jeu et d’effectuer les échauffements qu’il pratique habituellement avant une activité sportive. Aussi, il nous semble important de mieux comprendre la fatigue que produisent ces interactions afin de rendre plus accessible des pratiques comme la musique en RV. La pratique musicale avec des instruments physiques étant parfois compliquée pour des personnes en situation de handicap, les instruments de musique virtuels immersifs pourraient être une solution pour leur permettre d’accéder à cette pratique en proposant des instruments plus adaptés. Mais

l'interaction musicale pouvant être longue, les choix de conception pour ces instruments sont à effectuer en prenant en compte la fatigue qu'ils pourraient provoquer. Il en va de même d'ailleurs lors de la conception d'application à visée rééducative. L'objectif de porter les exercices de rééducation sur des applications ludiques en RV ou plus largement en mid-air, est de permettre au patient de pouvoir continuer sa thérapie depuis chez lui pour qu'elle soit plus rapidement efficace. Cependant, s'il devait faire trop d'effort sans forcément s'en rendre compte, il pourrait se re-blesser et perdre les bénéfices de la rééducation effectuée jusque-là.

Comprendre la fatigue musculaire pour la conception des applications en mid-air et RV devient un élément essentiel afin d'assurer un confort d'utilisation et aussi d'éviter des blessures. Ces applications ne se cantonnant plus à des utilisations en laboratoire ou dans l'industrie, il faut faciliter leur application pour le grand public. Dans cette optique, nous avons dégagé trois pistes de recherche que nous développerons dans les prochains chapitres de cette thèse. En particulier, nous nous intéresserons : aux potentielles différences en terme de fatigue lors d'interaction uni ou bi-manuelles, à l'impact du rythme et de la présence d'un son sur l'expérience utilisateur et enfin à l'impact de la variation du rapport contrôle-affichage (CDR) sur l'expérience utilisateur dans un instrument de musique virtuel immersif (IVMI).

1.1 Organisation de la Thèse et Aperçu des Contributions

Dans un premier temps, nous développerons l'historique et les définitions de l'interaction humain/machine, des interactions gestuelles et mid-air, des interactions multimodales et expertes et aussi de la réalité virtuelle. Nous présenterons, ensuite, certaines applications concrètes et certaines grand public de ces interactions qui pourraient mener à de la fatigue. Après quoi, nous explorerons les limites inhérentes à l'humain et comment elles sont abordées en interaction. Cela nous mènera à nous poser la question de la fatigue, ce pourquoi nous donnerons une définition plus précise de la fatigue musculaire que nous cherchons à éviter avant de présenter différents moyens de la mesurer et des études d'IHM qui se sont déjà penchées sur le sujet (voir Chapitre 2).

Par la suite, au travers de plusieurs expériences, nous avons cherché à étendre notre compréhension de cette fatigue lors de divers exercices en RV. En particulier, nous nous sommes intéressés à différentes synchronisations des mains, au rythme et au CDR, en nous appuyant sur les contextes d'applications pouvant occasionner de longues sessions d'utilisations comme le jeu vidéo et l'expression artistique.

Premièrement, nous avons étudié les différences entre interactions uni et bi-manuelles en terme de fatigue au cours de différentes tâches répétitives de sélection.

tion de cibles (voir Chapitre 3). Les gestes demandés pour ces tâches ressemblent à ceux que pourraient avoir à effectuer un patient en rééducation ou un utilisateur qui devrait interagir avec un jeu demandant une tâche répétitive. Nous avons effectué quatre expériences couvrant diverses synchronisations de mains et diverses activités. Il est apparu que la synchronisation de main devait être choisie au regard de la tâche à effectuer pour optimiser le rapport entre fatigue et efficacité. De plus, il semblerait préférable de laisser à l'utilisateur la possibilité d'utiliser ses mains comme il le souhaite afin qu'il auto-régule sa fatigue. En outre, il se pourrait que les changements de postures des utilisateurs ainsi que la distance qu'ils parcourent avec leurs mains soient des indicateurs de la fatigue. Enfin, nous avons pu vérifier que certaines directions de mouvements étaient plus fatigantes, en particulier celle verticale et certaines diagonales. Les travaux correspondant à ce chapitre(3) sont en cours de soumission au journal [IJHCS](#) (International Journal of Human-Computer Studies).

Secondement, suite notamment à l'analyse des retours des participants des précédentes expériences, nous avons exploré l'impact d'un rythme imposé aux gestes sur la fatigue des bras et sur l'expérience utilisateur (UX), lors d'un exercice de suivi de cibles (voir Chapitre 4). Cette exercice s'inspire entre autres du jeu de rythme en RV [SynthRiders](#). Au cours de cette expérience, nous avons fait varier la régularité et la vitesse du rythme et nous avons activé ou non un son qui soulignait ce rythme. Ce dernier, en particulier, s'il est irrégulier et lent, semblerait pouvoir réduire la sensation de fatigue et améliorer l'UX. De plus, si le rythme est souligné par un son simple, le participant pourrait percevoir la tâche comme étant plus fatigante mais également plus engageante qu'en l'absence de son. Le travail qui correspond à ce chapitre(4) a été soumis et publié à la conférence [Interact 2021](#) [139].

Enfin, nous avons voulu observer les effets de variations du CDR sur la fatigue et l'UX (voir Chapitre 5). Cette expérience s'est appuyée sur un instrument de musique virtuel immersif (IVMI) afin de motiver les gestes mid-air des participants. Ils ont dû explorer un cube musical alors que leurs gestes étaient visuellement amplifiés ou réduits, plus ou moins fortement. Quand le CDR est modérément modifié, il pourrait avoir un impact bénéfique sur l'UX lors de l'interaction avec un IVMI. Aussi, étonnamment, nous n'avons observé aucun impact significatif sur la fatigue alors que, pour une grande variation du CDR, les utilisateurs parcouraient moins de distance avec leur main et que cette distance était corrélée à la fatigue. Étudier le CDR sur des temps d'interaction plus longs nous permettra peut-être d'observer un impact sur la fatigue. Le travail qui correspond à ce chapitre(5) a été soumis et publié dans la conférence [NIME 2021](#)(New Interfaces for Musical Expression) [138].

En conclusion, nous avons pu retirer des implications sur les choix de conceptions les plus judicieux à effectuer lorsque l'on veut proposer des applications peu fatigantes en RV (voir Chapitre 6). Nous avons également proposé des idées de futurs

1.1. ORGANISATION ET CONTRIBUTIONS

travaux qu'il serait intéressant d'étudier, comme l'utilisation de la manipulation re-dirigée entre des zones de CDR différenciées ou l'étude des changements de postures comme indicateur de la fatigue.

Chapitre 2

Interactions Gestuelles et Limites Humaines

L'expansion des interactions entre humains et machines et plus particulièrement des interactions gestuelles, mid-air et en réalité virtuelle, nous mènera dans un premier temps à nous pencher sur leurs historiques et leurs définitions. Après quoi, nous présenterons quelques cas d'usages récents qui en sont fait et qui pourraient amener les utilisateurs à de longues sessions potentiellement fatigantes. Par la suite, nous verrons qu'en IHM la question des limites humaines est au cœur de nombreuses recherches. Enfin, nous définirons ce qu'est la fatigue musculaire du bras et plus particulièrement, nous présenterons des solutions pour la mesurer et des études en interaction qui se sont déjà penchées sur cette limite.

2.1 Interactions Gestuelles

2.1.1 Interaction Humain/Machine

Le domaine de l'Interaction Humain/Machine (IHM) étudie comment l'humain peut utiliser diverses machines, comment rendre leur utilisation plus simple et quels impacts cela pourrait avoir sur nos sociétés en mêlant plusieurs disciplines telles que l'informatique, l'électronique, les sciences cognitives, la sociologie, le design, l'ergonomie, etc. [50, 89]. Les interactions humain/machine n'ont cessé d'évoluer depuis le développement des technologies informatiques. Nous sommes passés d'ordinateurs extrêmement coûteux, encombrants et compliqués à utiliser, à des machines portables accessibles au grand public. L'IHM a d'ailleurs joué un rôle non-négligeable dans cette expansion [121] puisque qu'elle a permis le développement de nouvelles

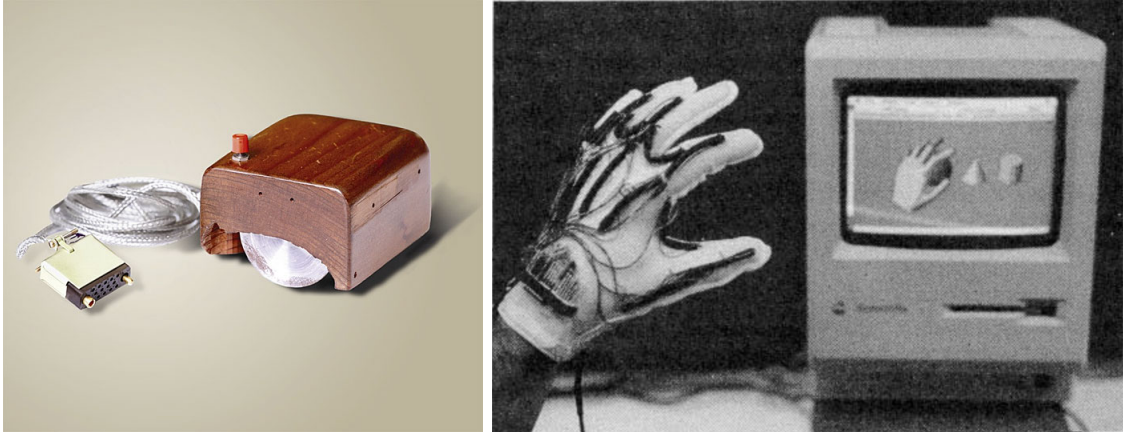


FIG. 2.1 – *Sur la gauche : première souris d'ordinateur [156]. Sur la droite : premier gant de données [181].*

interfaces bien plus simples à aborder pour des non-spécialistes. De nos jours, ce qui nous permet d'interagir avec nos ordinateurs plus puissants, plus petits et moins chers, ce sont ces interfaces très variées : écrans tactiles plus ou moins grands, interfaces gestuelles avec des systèmes de capture de mouvements, des casques de réalité virtuelle (RV), augmentée (RA) ou mixte (RM) qui deviennent de plus en plus abordables pour les particuliers. Avec ces nouvelles interfaces, l'IHM a développé des sous-domaines de recherches pour les étudier plus spécifiquement. Dans notre cas, ceux qui nous intéressent particulièrement sont les interactions gestuelles dans des environnements en 2D ou 3D, les interactions “mid-air” et la RV. Par la suite, nous définirons chacun de ces domaines.

2.1.2 Interactions Gestuelles et Mid-Air

Définition du Geste

Le geste est présenté par Cadoz [34] comme étant “le plus singulier et le plus riche des canaux de communication”¹. Effectivement, on peut sans difficulté concevoir la richesse des gestes puisque nombreuses de nos interactions quotidiennes se font à travers eux : la manipulation des objets qui nous entourent, l'écriture, le toucher, les activités sportives et artistiques, les langues des signes ou même un simple salut, etc. La réflexion de Cadoz s'inscrit aux prémisses de la recherche en interactions gestuelles qui serait un des derniers canaux de communication humain qui n'avait pas encore été exploré sérieusement pour communiquer avec la machine. C'est l'appa-

1. Les citations de textes originellement en anglais seront présentées sous la forme de traduction libre.

rition des souris [156] et des gants de données [181] (voir Figure 2.1) qui permettrait selon lui de développer l'intérêt de la recherche pour les gestes. Pour la description que fait Cadoz des gestes, l'interaction s'effectue surtout au travers de la main, et il propose trois catégories de gestes : "épistémique" qui récupère de l'information par le sens du toucher ou de l'haptique, "ergotique" qui transfère de l'énergie aux objets manipulés et "sémiotique" qui transmet de l'information à l'environnement. Cependant, ces trois catégories ne sont pas indépendantes, car les gestes que nous effectuons regroupent généralement plusieurs de ces fonctions, par exemple lors de la manipulation d'une balle anti-stress, nous la déformons par la pression que nous lui appliquons, mais nous récupérons également l'information de sa texture et sa mollesse par le retour tactile qu'elle nous apporte et enfin une personne nous observant manipuler cette balle pourrait comprendre en fonction de notre façon de la presser, à quel point nous pourrions être tendu. Par la suite, dans le cadre des interactions gestuelles avec une machine, Laviola et al. [100] définissent le geste comme "un mouvement effectué avec une intention spécifique pouvant être comprise et détecté comme un motif dans un flux de données". Selon eux, ces mouvements peuvent être catégorisés comme suit : les postures (l'utilisateur se fige dans une position statique quelques instants), les gestes (l'utilisateur effectue un mouvement dynamique sur une courte durée) et les activités (l'utilisateur effectue un mouvement dynamique en continu sur des temps plus longs) [100]. Cette catégorisation a surtout un intérêt pour déterminer les méthodes qui seront employées afin que l'ordinateur comprenne et interprète nos gestes.

Interactions Gestuelles et Mid-Air

Lors de nos interactions gestuelles, nous pouvons interagir avec des environnements en deux ou trois dimensions, mais nous pouvons également interagir dans un espace à deux ou trois dimensions. Par exemple, nous pouvons utiliser une souris sur une surface plane ou son doigt sur un écran tactile, donc 2D pour interagir avec un système bureautique en 2D également ou bien pour interagir avec des environnements 3D tels que des jeux vidéo ou des logiciels de créations 3D. Nous pouvons également interagir avec ces environnements au travers de gestes que nous effectuons dans l'espace 3D devant nous par exemple en pointant du doigt des boutons d'un menu ou en appliquant des rotations à des objets modélisés en 3D comme s'ils étaient dans nos mains. Ce sont ces dernières interactions que nous qualifierons de mid-air. Aussi, Beaudouin-Lafon [20] classe ces différentes interactions sur une échelle d'indirection. C'est-à-dire qu'en se basant sur la définition de l'interaction directe de Schneiderman [153], il considérera que les interactions sont directes "lorsqu'il y a action directe sur les objets de l'application par l'intermédiaire des périphériques de localisation" [20] (comme la souris, le stylet, la manette, la main, etc.), et il qualifiera d'indirectes les interactions lorsqu'il y a "la sélection des commandes dans les

menus, l'entrée de données dans les boîtes de dialogue et de propriétés, l'utilisation des palettes et barres d'outils" [20]. Le degré d'indirection se retrouve donc, entre ces deux extrêmes, à varier en fonction des décalages spatiaux et temporels générés lors de l'interaction.

Les technologies pour l'interaction mid-air. Pour interagir en mid-air, il a fallu développer des technologies permettant la reconnaissance des positions, des rotations, des mouvements et des postures de la main et du bras des utilisateurs. Pavlovic et al. [131] proposent une liste des premières technologies utilisées pour cela et nous y trouvons : les gants de données (comparables à celui présenté dans la Figure 2.1) et les caméras avec la vision par ordinateur qui doivent se baser, dans un premier temps, sur des modèles très simplifiés du bras et de la main. Par la suite, si des gants ont continué à être développés, il s'agit plus alors de gants à retour de force pour permettre un retour haptique réaliste dans la sensation de palpation [70]. Par contre, le suivi de la main basée sur la vision par ordinateur a été plus largement explorée que ce soit avec marqueurs ([Vicon](#), [PhaseSpace](#), [OptiTrack](#)) ou sans [118, 148, 182] au point de mener au développement de caméra de profondeur comme la Kinect ou d'appareil spécifiquement dédiés au suivi de la main comme le Leap Motion [4]. Cependant, ce ne sont pas les seuls systèmes qui permettent le suivi de la position de la main. On peut effectivement trouver une autre catégorie d'appareils qui sont tenus en main et qui sont suivis en position et orientation [31] comme la Nintendo Wiimote et par la suite les divers contrôleurs de RV et les Nintendo Joycons.

Élaboration des gestes pour l'interaction mid-air. Une fois que nous sommes capables de capturer les gestes, il faut pouvoir les définir et les utiliser. De nombreuses recherches ont proposé des techniques d'interactions gestuelles [31] ou des méthodes pour générer son dictionnaire de gestes en fonction de l'application visée [8, 124].

Que ce soit pour Aigner et al. [8] ou Nielsen et al. [124], le développement de gestes est dépendant de l'application et de l'action à réaliser et il doit être pensé avec/pour les utilisateurs. Développer des gestes simplement en fonction de la technologie utilisée mène à des gestes potentiellement difficiles à réaliser par l'utilisateur bien que plus simple à identifier [124]. Mais développer des gestes juste en fonction de ce que pourraient proposer des utilisateurs peut mener à des gestes peu efficaces [8].

Bowman et al. [31] catégorisent les techniques d'interactions 3D comme suit : navigation (par exemple : exploration sans but, recherche, manoeuvres par balayage, marche ou téléportation), manipulation (par exemple : sélection, positionnement, redimensionnement et rotation d'objets), contrôle du système (par exemple : via des commandes vocales, des outils virtuels, des menus virtuels, etc.). Le nombre de techniques d'interactions qui existent de nos jours, est compliqué à déterminer tant il

doit être élevé et nous ne pourrions pas les dénombrer ou toutes les lister dans cette thèse.

Autres Interactions

Le domaine de l'IHM ne se restreint évidemment pas qu'aux interactions gestuelles ou mid-air. Il existe de nombreuses autres catégories d'interactions qui parfois se recoupent avec entre elles comme le tactile qui souvent peut être assimilé à de l'interaction gestuelle au même titre que l'utilisation d'une souris. Parmi les catégories d'interactions qui existent, nous présenterons celles que nous estimons être reliées assez directement à notre recherche de la compréhension de la fatigue musculaire en interaction. Les premières que nous avons choisi de présenter sont les interactions multimodales et les suivantes seront les interactions expertes.

Interactions multimodales. Les interactions gestuelles sont parfois accompagnées d'autres modalités d'interactions comme la voix. Dans l'étude "Put That There" de Bolt et al. [27], la voix et le geste sont donc mélangés pour permettre de donner une simple commande "place ça ici" où *ça* correspond à un objet désigné par un geste de pointage et *ici* est une localisation désignée par un autre geste. On parle alors d'interaction multimodale.

Est multimodale ce qui emploie plusieurs moyens ou modes pour arriver à sa fin. Nous comprenons donc que les interactions multimodales regroupent tous les mélanges de modes d'interactions. Turk propose une analyse de l'état de la recherche dans ce domaine [163] et cite donc quelques exemples comme l'étude de Bolt et al. [27] qui est la première étude à s'être fait connaître en interaction multimodale. Turk fait également référence à d'autres interactions comme celle proposée par Koons et al. [97], cette dernière étant basée en plus de la voix et du geste sur le regard. Quickset [44] y est référencé, il s'agit d'une interaction mêlant l'utilisation du stylet et de la voix pour un simulateur d'entraînement du Corps des Marines des États-Unis.

L'un des attraits principaux de ces techniques d'interaction est qu'elles sont généralement perçues comme plus naturelles car l'humain interagit quotidiennement de façon multimodale [128, 163]. De plus, elles permettent de palier à certaines limites des techniques n'utilisant qu'une modalité. Par exemple, la fatigue produite lors d'interaction gestuelle pure peut être réduite en remplaçant certains gestes par d'autres modalités d'interaction comme le regard pour du pointage ou la voix pour une commande. Cependant, certains cas d'usages d'interfaces gestuelles comme, par exemple, la rééducation, n'ont pas l'intérêt d'utiliser des interactions multimodales puisque l'un des objectifs de ces interfaces est de faire bouger l'utilisateur.

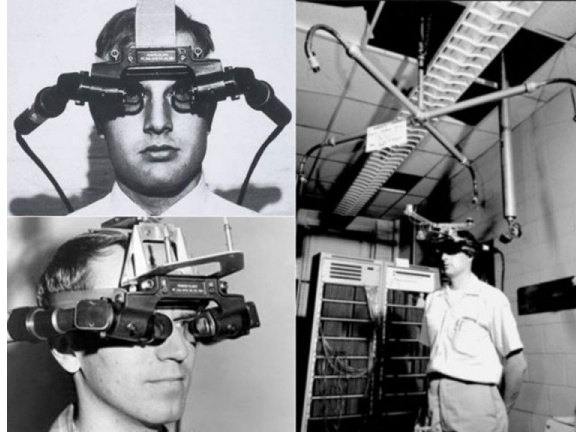


FIG. 2.2 – *Ivan Sutherland 1968 : L'épée de Damoclès.*

Interactions expertes. Certaines interactions dites expertes, sont plus difficiles que d'autres à prendre en main parce qu'il faut généralement apprendre des raccourcis clavier, des gestes moins intuitifs ou des commandes orales [98]. Ces interactions ont toutefois l'intérêt de représenter un gain de performance une fois maîtrisées. De nombreuses applications proposent d'ailleurs plusieurs techniques pour interagir en fonction de notre expertise. C'est d'ailleurs un des critères d'utilisabilité défini par exemple par Nielsen [123] : flexibilité et efficacité (il faut avoir plusieurs façons de contrôler un système, dont certaines dédiées aux experts). Par exemple, on peut se contenter de l'utilisation de l'interface graphique et passer par les divers menus proposés ce qui peut s'avérer particulièrement inefficace, ou nous pouvons utiliser les nombreux raccourcis claviers disponibles mais pénibles à retenir et parfois difficiles à découvrir.

Comme pour les interactions multimodales, ces interactions expertes peuvent représenter des alternatives lors d'interactions gestuelles qui seraient potentiellement plus difficiles à maîtriser, mais moins fatigantes à terme.

2.1.3 Réalité Virtuelle

Sutherland qui est un des précurseurs de la réalité virtuelle présente dans son papier "The Ultimate Display" [158], "l'affichage ultime serait, bien sûr, une pièce dans laquelle l'ordinateur peut contrôler l'existence de la matière." Idée irréalisable dans l'état actuel de nos connaissances mais Sutherland n'a pas que proposé des idées, il a également contribué à la création du premier casque de réalité augmentée "L'épée de Damoclès" (voir Figure 2.2).

Définition de la Réalité Virtuelle

La réalité virtuelle (RV) est parfois définie par l'ensemble des technologies permettant d'afficher un environnement ou un monde virtuel en temps réel et d'y immerger un utilisateur qui pourra interagir avec [74]. La RV fait également parfois référence directement à l'environnement qui est affiché par des systèmes de RV. Cependant il faut bien différencier la RV des mondes virtuels puisque même si elle peut en afficher, la RV propose souvent des applications pour un unique utilisateur à la fois or nous verrons par la suite que le "monde virtuel" se définit entre autre par l'interaction multi-utilisateurs. Les points importants de la RV sont le réalisme temporel et spatial [74] : pour le réalisme temporel, il faut que les actions de l'utilisateur soient rendues en temps réel, sans décalage et pour le réalisme spatial, il faut que l'utilisateur puisse observer son environnement en 3D sous différents angles en se mouvant dedans. Dans *le Traité de la Réalité Virtuelle* [60], une définition plus complète est proposée mais relève tout de même l'importance de l'immersion et l'interaction. "La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs." En d'autres termes, toutes les actions physiques que fera un utilisateur dans un environnement virtuel tridimensionnel au travers d'un système interactif de réalité virtuelle doit provoquer une réaction sensorielle (visuelle, audio, haptique...) de l'environnement instantanément ou avec suffisamment peu de délais pour ne pas déranger l'utilisateur.

Mondes ou Environnements Virtuels

Dans la littérature de nombreux termes réfèrent aux mondes virtuels (monde virtuel immersif, monde virtuel multi-utilisateurs, environnement virtuel, environnement virtuel immersif) cependant parfois ces termes désignent également d'autres concepts. Il est difficile, dans la littérature, de faire la part des choses. Pour Girvan [65], un monde virtuel est : "un environnement simulé qui correspond à la définition suivante d'un monde : (1) Un espace partagé qui est habité et façonné par ses habitants. (2) Les expériences et l'interprétation de ces expériences ne sont pas fixes car elles se font par l'intermédiaire de nos corps physiques et de nos réponses psychologiques. (3) À travers nos corps physiques, nous nous déplaçons dans l'espace partagé, interagissant avec des objets et d'autres personnes, avec lesquels nous construisons une compréhension partagée du monde à ce moment-là." La différence avec le monde physique est l'expérience que vivra l'utilisateur dans ce monde virtuel. Par ailleurs, il faudrait éviter de faire opposition au monde virtuel par "monde réel" car cela indiquerait que le virtuel n'est pas réel. Il faudrait donc préférer parler de monde physique,

naturel ou matériel. [152]

Dans cette thèse nous ferons référence donc plutôt à des *environnements virtuels* voir *environnements virtuels immersifs* puisque le qualificatif de monde ne correspondrait pas avec la définition précédente, à savoir, nous proposerons des interactions dans un environnement 3D dit immersif puisque présenté à l'utilisateur au travers d'un casque de RV.

Expérience Utilisateur et Présence

Girvan [65] fait également référence à un concept clé en interaction qui est l'**expérience utilisateur** (UX) et la sensation de **présence**. Rebelo et al. [134] expliquent que l'expérience utilisateur n'a pas encore de définition universelle mais en assimilant les diverses définitions existantes, ils proposent la définition suivante : "L'UX comprend les réactions et réponses de l'utilisateur lors de l'interaction avec un produit, du moment où l'on y est confronté jusqu'au moment où on l'utilise dans un certain contexte." Quant à la présence, Witmer et Singer [175] la définissent comme "la sensation subjective d'être dans un lieu ou un environnement même si l'on est physiquement dans un autre." Ils proposent d'ailleurs un questionnaire pour évaluer à quel point l'environnement virtuel arrive à faire ressentir cette présence à l'utilisateur, cependant dans cette thèse nous utiliserons une version plus récente du questionnaire de présence proposée par Schneider et al. [147].

2.2 Usages Concrets et Grand Public des Interactions Mid-Air

Les applications concrètes de l'utilisation des gestes mid-air et de la RV ne manquent pas de nos jours. Une des premières portes d'entrées pour le grand public avec les interactions gestuelles en mid-air dans des environnements 3D a été la Nintendo Wii avec sa manette la Wiimote [30] qui maintenant est remplacée par la manette Joycon de la Switch du même constructeur. La Kinect de Microsoft aura aussi conquis une part du public, mais est moins répandue pour un usage vidéo-ludique pure. Effectivement cette caméra de profondeur est plus largement utilisée dans la recherche, la rééducation ou les applications avec du public que dans les jeux vidéo. Dans leur revue systématique de la littérature autour de la RV, Berntsen et al. [21] montrent que trois des principaux centres d'intérêt dans ce domaine sont la santé, l'exploration (héritage culturel, musée, tourisme, etc.) et la présentation et le divertissement (architecture, sécurité, planification et pur divertissement). Évidemment, le domaine a encore évolué depuis 2016, mais il semble

raisonnable de penser que ces trois centres d'intérêt sont toujours d'actualité. Aussi, il semblerait que ces derniers soient étudiés également plus largement en interaction mid-air.

Effectivement, les exemples récents d'études et de cas d'usage de la RV ou des gestes mid-air ne manquent pas :

- En santé pour la rééducation physique ou cognitive en RV [25, 33, 35, 93, 127, 145, 162] ou avec des caméras de profondeur [19, 54, 96, 130].
- En santé pour la chirurgie [14, 32, 94].
- Dans le divertissement, le nombre d'expériences ludiques en RV ne fait que croître sur les différents magasins de jeux en ligne (Steam [3], Viveport [1], Oculus [2], etc.) où les tops des ventes sont des jeux de simulations sportives, des jeux d'horreur ou des jeux de rythme.
- Dans la formation et l'enseignement [53, 83, 110, 165].

2.3 Limites Humaines

Dans le premier volume du traité de la réalité virtuelle [60], un chapitre complet s'intéresse à la discipline de l'ergonomie ou des facteurs humains. Les auteurs y détaillent entre autres, les limites inhérentes à l'humain que les concepteurs d'applications interactives doivent prendre en compte pour que ces dernières soient "ergonomiques", c'est-à-dire qu'elles atteignent certains objectifs en terme d'"utilité, utilisabilité, accessibilité, dangerosité, satisfaction et acceptabilité". L'utilité de l'application correspond à son avantage à répondre à un besoin de l'utilisateur, l'utilisabilité est un concept se rapportant à la facilité d'utilisation du système, l'accessibilité concerne l'inclusion du handicap dans les choix de conception, la dangerosité comprend surtout l'impact du système sur la santé de l'utilisateur (*p.ex.* troubles musculosquelettiques) mais également sur son environnement (*p.ex.* si l'utilisateur est en apprentissage dans un simulateur défectueux, il peut acquérir de mauvaises habitudes qui lors de l'utilisation dans le cadre concret se révéleront dangereuses), la satisfaction est tout simplement le degré de plaisir que procure l'utilisation de l'application à l'utilisateur et enfin l'acceptabilité correspond à comment l'utilisateur perçoit le système et s'il est enclin ou non à vouloir l'utiliser. Pour revenir plus directement sur les limites humaines, nous désignerons deux catégories, physiques et cognitives. L'humain est effectivement limité par ses caractéristiques physiques comme sa corpulence (masse, taille), sa force musculaire, son endurance, sa capacité respiratoire, sa souplesse, etc. Mais il est également limité par ses capacités cognitives comme sa mémoire, sa capacité de raisonnement, sa perception, sa motricité, son attention, etc. Tous ces points sont donc à prendre en compte lors de la conception d'applications et la recherche s'y est donc intéressée.

2.3.1 Interactions et Limites Cognitives

Une des premières limitations cognitives que nous pouvons présenter est la capacité de mémorisation à court terme. Cette dernière est connue pour être limitée à entre 5 et 9 objets d'intérêts [92, 115]. Il est donc d'usage de proposer des interfaces avec peu d'éléments interactifs pour ne pas perdre le participant. Aussi, si ces éléments sont trop nombreux, outre le problème de la mémoire, celui de la perception ou de l'abstraction visuelle se pose. Par exemple, il semblerait qu'il ne faille pas dépasser les 25 icônes dans une interface graphique 2D [151]. Cependant certaines études se sont demandées si elles pouvaient utiliser cette limitation humaine à leur avantage pour par exemple masquer le gain de rotation lors d'une marche redirigée en augmentant la densité d'objets dans l'environnement virtuel mais il semblerait que cette étude n'ait pas abouti [129].

Ensuite, vient également la difficulté posée par la demande d'attention induite par le système. Il est intéressant de remarquer que les interactions qu'ont les humains en dehors de la machine demandent des niveaux d'attention différents. Voir parfois pour une même tâche, nous ne lui porterons pas toujours le même niveau d'attention. Ce niveau peut varier du fait que l'activité en question est routinière ou nouvelle ou bien que cette activité est plus ou moins difficile à effectuer dans un certain contexte. Pour exemple d'une activité à niveaux d'attention variables, nous proposons l'écoute de musiques. En effet, il se peut que l'on soit particulièrement concentré sur notre écoute par exemple pour en retenir la mélodie ou les paroles d'une musique qui nous plaît particulièrement ou au contraire, on peut y faire à peine attention et ne l'avoir que comme fond sonore lors d'une autre activité. Bakker et Niemantsverdriet [18] proposent de classifier les interactions comme suit : "interaction focalisée, interaction périphérique et interaction implicite". L'interaction focalisée correspond par exemple à l'interaction avec le smartphone puisque nous devons nous concentrer sur l'écran pour effectuer nos actions. L'interaction périphérique correspondrait par contre à l'exemple cité plus tôt soit l'écoute de musique en fond sonore, puisque nous pouvons à tout moment reporter notre attention sur une musique en particulier pour chanter avec, mais alors on risque de détourner notre attention de la tâche principale que nous étions en train d'effectuer. Enfin, l'interaction implicite correspond plutôt à celles produites par nos objets connectés comme la machine à café qui repasse automatiquement des commandes en fonction du nombre de cafés déjà consommés.

Plusieurs recherches se sont questionnées sur les choix de conception qui pourraient influencer cette demande d'attention. Par exemple dans le cadre d'une étude en interaction tactile, Rekik et al. [135] suggèrent qu'il faudrait éviter de trop éparpiller les objets à manipuler lorsque les interactions sont bimanuelles, mais aussi que l'utilisation d'une seule main demande à l'utilisateur moins d'attention que lorsqu'il doit se concentrer sur l'articulation du mouvement des deux. D'autres études se sont intéressées à des cas d'usage plus critique de la demande d'attention comme

lors de l'interaction en conduite d'une automobile [16]. Ces cas sont plus critiques puisqu'une distraction trop importante de la tâche de conduite peut mener à un accident rapidement grave. Les études rapportées par Bach et al. suggèrent de nombreux points qui peuvent détourner l'attention du conducteur. L'un des sens les plus utilisés dans la conduite étant la vue, la perception visuelle est également impliquée dans les questions d'attention. Si trop d'éléments sont dans notre champ de vision, il est difficile de percevoir les éléments essentiels et notre attention se divise donc entre plusieurs éléments. Il semblerait qu'il en aille de même pour les interactions dans un poste de pilotage d'avion. Une étude s'est concentrée sur des modifications de l'affichage des informations d'un tableau de bord en encadrant les informations jugées comme étant les plus importantes pour éviter des accidents ou incidents [103].

Toutes ces études se sont focalisées sur les efforts demandés en lien avec la vision alors que d'autres ont porté leur attention sur l'utilisation de l'audio (voix et ouïe) pour permettre une interaction sans besoin des mains ni des yeux qui peuvent rester concentrés sur la conduite. Par exemple, Day et al. [48] ont exploré l'utilisation de sons spatialisés pour fournir des informations de guidage d'un GPS afin de pouvoir se passer d'un écran qui affiche les informations de directions et qui peut potentiellement trop distraire le conducteur. L'utilisation de l'audio a aussi été testée dans le cadre de la mémoire et elle améliore la mémorisation des objets d'intérêt, la sensation de présence ainsi que celle que l'environnement virtuel est réaliste [47]. Toujours pour améliorer la capacité mémorielle, Ghomi et al. [63] ont utilisé des motifs rythmiques dans les gestes.

Prendre conscience de toutes ces limites cognitives lors de l'interaction et de ce qui les impacte est important également dans notre recherche pour comprendre la fatigue musculaire puisque des liens entre l'état psychologique d'une personne et son état de fatigue physique ont déjà été trouvés. Par exemple, il a été montré que la fatigue musculaire pouvait réduire les performances cognitives lors d'une tâche demandant un effort physique et mental [155]. Mais réciproquement, la fatigue cognitive a aussi un impact négatif sur les performances physiques [143].

2.3.2 Interactions et Limites Physiques

Comme nous l'avons soulevé plus tôt, les capacités humaines ne sont pas limitées que par l'aspect cognitif, mais aussi physique.

Une première limitation est articulaire. Une étude proposant une technique d'interaction basée sur la rotation du poing soulève le fait que nous ne pouvons humainement pas effectuer cette rotation au-delà de 140 degrés [108]. D'ailleurs si l'on se base sur les données anthropométriques de la NASA (NASA-STD-3000 [5]), on peut se faire une idée plus précise des mouvements qui sont possibles ou pas. Par

la suite, nous baserons nos choix de conception pour les expériences que nous présenterons sur les mesures que nous y avons trouvées pour le positionnement des diverses zones interactives afin qu’elles soient toutes accessibles. Effectivement, une des limites humaines que nous mentionnions est la corpulence d’un individu.

On imagine d’ailleurs assez facilement le lien entre la condition physique d’un humain et la fatigue musculaire qu’il pourra éprouver. Dans la section 2.4.1 qui se concentre sur la définition de la fatigue musculaire, nous relevons qu’une activité trop importante sans phase de récupération peut mener à des blessures ce qui correspond à une autre limitation physique à laquelle nous devons faire face lors de la conception d’applications interactives.

2.4 Fatigue Musculaire des Bras

2.4.1 Définition

La fatigue se définit par une diminution des performances physiques ou cognitives faisant suite à un effort [49] tel qu’un entraînement sportif ou la préparation et le passage d’un examen académique. Elle est généralement de courte durée, car du repos suffit normalement à la diminuer. Dans le cas où de la fatigue persisterait sur des semaines, malgré le repos, on parlerait d’asthénie [38], ce qui sort du cadre de notre étude.

Nous allons nous intéresser, pour cette thèse, à la fatigue physique ou musculaire qui se caractérise par une difficulté ou impossibilité à effectuer une contraction volontaire d’un muscle [172]. Cette fatigue, si elle s’accumule par l’absence d’une prise de repos suffisante, peut mener à des blessures directes ou indirectes et plus ou moins graves. Par exemple, il a été montré qu’une personne fatiguée au niveau des muscles du bas du corps aura moins d’équilibre qu’une personne non fatiguée dans cette zone et aura donc plus de risque de chuter et se blesser [86].

Plus particulièrement, nous voulons étudier la fatigue musculaire des bras et l’effet “bras de gorille” [29, 68, 72, 76, 161, 168] connu pour apparaître lors d’interactions prolongées en mid-air. Cet effet se caractérise par une lourdeur des membres supérieurs que l’on peut facilement ressentir lorsque l’on garde nos bras tendus en face de nous pendant un certain temps par exemple.

2.4.2 Méthodologies pour Mesurer la Fatigue Musculaire

Pour étudier cette fatigue, nous devons d'abord pouvoir la mesurer et pour cela nous allons présenter trois des principales techniques que l'on peut employer.

L'électromyographie (EMG) et plus précisément ici l'électromyographie de surface (sEMG) est la première méthode que nous allons présenter. L'électromyographe sert à évaluer la conductivité des fibres nerveuses qui composent le muscle et qui lui permettent de se contracter [49, 107]. Pour cela, l'appareil fait passer un léger courant électrique via des électrodes positionnées aux extrémités du muscle étudié. Ces électrodes peuvent prendre la forme d'aiguilles pour l'EMG de base mais pour l'EMG de surface on utilise de simples patches. L'EMG possédant des aiguilles ne permet pas au patient de vraiment bouger car la méthode est trop invasive. Florimond [56] a décrit l'utilisation des sEMG en fournissant des détails sur l'acquisition et le traitement des signaux EMG. Il relève d'ailleurs le fait que le suivi de la fatigue musculaire est particulièrement utile pour éviter les blessures ou récurrences par exemple lors d'activités sportives ou d'exercices de rééducation. Cifrek et al. [42] ont proposé une analyse de la façon d'utiliser le sEMG pour mesurer spécifiquement la fatigue musculaire et expliquent en détail comment la fatigue musculaire affecte le signal EMG. Comme il a également été rapidement expliqué dans l'article de Florimond [56], l'activité musculaire provoque une production de lactates (acide lactique ionisé) qui induit la diminution de la vitesse de conduction des fibres musculaires par la variation du pH. Cette diminution de la conductivité du muscle impacte à son tour le signal EMG en abaissant les fréquences et en augmentant l'amplitude de ce signal. En outre, les sEMG ne sont pas seulement utilisés pour mesurer la fatigue. Aung et al. [12, 13, 11] a choisi ce type de biocapteurs pour la visualisation de l'activité musculaire lors d'exercices de rééducation en réalité augmentée. Les participants pouvaient observer à quel point ils sollicitaient tel ou tel muscle ce qui semblait augmenter leur motivation à effectuer les exercices de rééducation. Chowdhury et al. [41] développe d'ailleurs plus largement les différentes utilisations des EMG dans des systèmes interactifs.

La **biomécanique** est la deuxième méthode que nous présenterons. Il s'agit de l'étude des mécanismes biologiques qui composent les organismes vivants comme la mécanique des fluides sanguins, ou encore la mécanique du mouvement et de l'activité musculaire. Ici, quand nous parlerons de biomécanique, il s'agira d'étudier ce dernier point. Selon Motti et al. [62] l'analyse biomécanique pourrait aider à identifier les mouvements qui présentent un risque de favoriser l'apparition de troubles musculo-squelettiques. L'utilisation d'un modèle biomécanique pour fournir un niveau absolu de fatigue est limitée par le fait qu'il ne prend pas en compte la condition physique [59]. La biomécanique est donc plus adaptée pour comparer la fatigue induite par diverses stratégies de mouvement. Néanmoins, certaines méthodes de quantification de la fatigue musculaire ont vu le jour. En IHM, une

2.4. FATIGUE MUSCULAIRE DES BRAS

nouvelle métrique a été proposée par Hincapié-Ramos et al. [76]. Il s'agit de l'Endurance Consommée (CE) et elle permet de mesurer la fatigue pendant l'interaction mid-air. Ils utilisent une caméra de profondeur de type Kinect pour capturer les mouvements des utilisateurs et en particulier les articulations des bras (épaule, coude, poignet, pointe de la main). Cette technologie a l'avantage d'être peu coûteuse et non invasive mais elle ne procure qu'un squelette basique et bruité ce qui rend les mesures moyennement fiables. Avec cela, ils calculent le centre de masse du bras [58] et déterminent via un modèle biomécanique, et basé sur la définition du temps d'endurance (ET) [140], le CE de l'utilisateur pendant l'interaction. Pour exploiter plus efficacement la capacité du Kinect, Jang et al. ont proposé une autre mesure basée sur CE appelée Fatigue Cumulative (CF) [81]. Cela correspondrait à une amélioration de la CE qui prendrait en compte le temps de repos selon eux. Cependant, Liu et al. [106] ont testé la précision du modèle CF et ont constaté qu'il sous-estimait la fatigue pendant l'activité. Et ils ont également constaté que plus il était utilisé longtemps, moins il était précis. Enfin, une autre approche de la rétroaction biomécanique consiste à utiliser la capture de mouvement basée sur des marqueurs (mocap), une méthode qui fournit beaucoup plus d'informations comme décrit par Bachynskyi et al. [17]. Effectivement, en comparaison à la caméra de profondeur, ce système, bien que nettement plus onéreux et encombrant, procure des données de positionnement plus précises. Ils utilisent un système de mocap basé sur des marqueurs corporels complets pour récupérer des informations comparables aux goniomètres, à la vidéométrie, aux accéléromètres, aux plaques de force, aux dynamomètres et à une partie des informations obtenues par sEMG. Les informations obtenues comprenaient: les angles articulaires, la posture, la cinématique, les forces et les mouvements au niveau des articulations, la charge musculaire et l'activation musculaire. Cependant, comparé aux systèmes basés sur les caméras de profondeur type Kinect, les systèmes de captures basées sur marqueurs sont beaucoup plus chers et invasifs pour les utilisateurs. De plus, ces deux techniques ne sont pas compatibles avec certains types de casques de RV tels que ceux basés sur le suivi de SteamVR car des interférences peuvent se produire entre eux. Or, dans les expériences que nous présenterons pas la suite, nous avons utilisé des casques de ce type car, entre autres raisons, ces derniers font parti des meilleurs sur le marché.

La dernière et la plus courante façon d'évaluer le niveau de fatigue d'une personne est d'utiliser des **questionnaires** et plus précisément **l'échelle de Borg** de l'effort perçu [28]. C'est ce qu'avaient utilisé Hincapié-Ramos et al. [76] pour évaluer leur propre métrique. Les principaux avantages de l'échelle Borg sont de prendre en compte le niveau physique des utilisateurs, d'être peu coûteux et simple à mettre en place. Il y a plusieurs versions de l'échelle, mais l'une des dernières est l'échelle Borg CR10 de 2010 [73]. Cette version utilise une échelle de 0 à 10 avec les niveaux de fatigue suivants :

- 0.5 - Extrêmement faible

- 1 - Très faible
- 2 - Faible
- 3 - Modérée
- 5 - Forte
- 7 - Très forte
- 10 - Extrêmement forte

Contrairement à d'autres approches, l'échelle de Borg ne fournit pas une mesure continue de la fatigue, et nécessite donc une évaluation périodique soit verbalement, soit à l'aide d'une interface. Elle a cependant été complètement validée, ce qui nous a conduit à sélectionner cette méthode pour les expériences que nous présenterons dans cette thèse.

2.4.3 Interactions et Fatigue

Comprendre le comportement des utilisateurs et l'effet des nouvelles configurations technologiques interactives sur la fatigue musculaire, dès les premiers stades de la conception, permet de disposer d'informations précieuses pour développer des techniques d'interaction efficaces et efficientes. Plusieurs études ont été menées sur les interactions gestuelles pour proposer des directives quant aux choix de conceptions pour des applications en contrôle de la fatigue.

Dans le cadre de l'interaction tactile, des chercheurs ont analysé l'impact de l'orientation de l'écran sur la fatigue musculaire [9, 7]. Leurs résultats indiquent que les configurations horizontales sont plus confortables que les verticales, car elles réduisent le risque d'endommager les muscles [9] et plus précisément qu'une inclinaison de 22,5 degrés est la moins fatigante pour les écrans de 13 pouces (33 cm) [7]. Kang et al. ont analysé l'emplacement idéal de cibles à l'écran [88] et ont conclu que les cibles avec lesquelles les utilisateurs interagissent davantage devraient être en bas de l'écran. La taille des écrans tactiles a également été étudiée en terme de fatigue [104]. Les auteurs ont constaté qu'un écran de 28 pouces (71 cm) est probablement la meilleure taille pour optimiser la fatigue et les performances. Différentes études ont également été menées sur les interactions mid-air non tactiles, avec des résultats similaires concernant le meilleur emplacement pour les cibles [76]. En utilisant la métrique CE, Hincapié-Ramos et al. [76] ont constaté que la meilleure conception pour une saisie de texte en mid-air consiste à placer les lettres les plus utilisées en bas à droite du clavier virtuel pour les droitiers. Aussi, des mouvements du bras dans une zone basse, leur permettant de rester proches de leur position de repos, se sont finalement avérés produire une fatigue du bras inférieure aux gestes où le bras est plus élevé et étendu [105, 144].

Une étude récente [40] prend le contre-pied des études classiques de la fatigue par

2.4. FATIGUE MUSCULAIRE DES BRAS

la biomécanique en proposant de prédire la fatigue produite par une tâche donnée en la faisant exécuter par une IA suivant des modèles de biomécanique (ils arrivent d'ailleurs à obtenir des résultats comparables au BorgCR10). Cette étude est ensuite citée par d'autres qui cherchent à leur tour à évaluer certains paramètres comme la difficulté d'un jeu ou l'engagement d'un joueur sans joueur physique [142, 141].

Par ailleurs, en réalité virtuelle, Montoya et al. [117] ont montré que lors de la rééducation l'utilisation d'un casque de RV plutôt que d'un simple écran améliore l'expérience utilisateur en jeu et réduit la fatigue perçue. Cela semble valider les études montrant un lien intrinsèque entre la psychologie du participant et sa fatigue physique.

Enfin, il existe également des études sur l'impact de la fatigue sur les gestes. Elles suggèrent ainsi que la présence de fatigue diminue l'amplitude des positions du coude [46], et l'amplitude générale du mouvement [61]. Yang et al. [177] ont constaté également que lors de l'exécution d'une tâche de pointage fatigante répétitive, la coordination de l'épaule et du coude est dégradée par la fatigue. Ils ont aussi observé que le tronc accompagne le mouvement lorsque l'épaule et le coude sont trop fatigués [178]. Il a aussi été montré que la fatigue diminue les performances des utilisateurs lors d'une tâche de pointage à la souris (l'utilisateur a plus de mal à rester dans la cible et applique donc une stratégie de correction de ses mouvements pour essayer de respecter au mieux la consigne) [79].

Chapitre 3

Étude de la Fatigue Perçue des Bras lors de la Réalisation d'une Tâche Répétitive en Mid-air à Une ou Deux Mains

3.1 Introduction

Comme nous l'avons indiqué précédemment (voir Chapitre 1), la RV est en train de s'étendre à un plus large public d'utilisateurs avec de nouveaux casques aux prix abordables et proposant une qualité et un confort comparables aux casques que l'on pouvait trouver dans les laboratoires ou l'industrie. Le nombre d'applications en RV a également explosé et elles s'étendent maintenant à de nombreux domaines (éducation, rééducation, simulations, tourisme, musée, jeux, etc.). Ces applications demandent aux utilisateurs d'interagir avec l'environnement virtuel 3D via des gestes en mid-air ou des capteurs tels que des boutons et des joysticks ou encore une combinaison des deux.

Dans le même temps, les gestes mid-air sont particulièrement intéressants pour interagir dans un environnement virtuel car : (i) il s'agit déjà d'un des moyens d'interaction entre humains le plus répandu [34], (ii) les interactions gestuelles mid-air offrent un grand nombre de degrés de liberté aux utilisateurs, ce qui leur permet d'articuler des gestes avec une ou deux mains, un nombre variable de doigts ou encore de façon synchrones ou asynchrones, symétrique ou asymétrique [8, 45] et

3.1. INTRODUCTION

(iii) les gestes mid-air sont utilisés dans une majorité des techniques d’interaction 3D [30, 31, 100, 101] (sélection et manipulation d’objets [10, 82], navigation [82], mimétisme de chemin ou suivi de chemin à distance et rythme [36], etc.).

Dans le contexte des interactions gestuelles, parmi les exemples cités ci-dessus, il existe à la fois des interactions à une main et à deux mains. Plusieurs études ont été menées pour explorer les différences entre ces interactions. Pour le moment, ces études ont exploré les sujets suivants : l’efficacité de l’interaction à une ou deux mains avec un grand écran horizontal [78], la posture de l’épaule et du poignet et activité musculaire lors de l’interaction avec la tablette tactile [179], la demande d’attention pendant de l’interaction tactile et tangible [135] ou l’efficacité, la précision et les préférences de l’utilisateur pour l’interaction avec un environnement de réalité augmentée (RA) [39]. D’ailleurs, Chaconas et Höllerer [39], dans leur étude, ont soulevé lors des entretiens avec les participants, la présence d’un sentiment de fatigue qui était plus ou moins fort selon les conditions d’utilisation des mains.

Cependant, à notre connaissance, aucune étude ne s’est concentrée sur l’effet du nombre de mains et de leur synchronisation sur la fatigue, alors qu’il est bien connu qu’une longue session d’interaction en mid-air peut entraîner une sensation de fatigue dans les bras connue sous le nom d’“effet bras de gorille” [29, 76].

Dans le même temps, la fatigue du bras est un paramètre important à prendre en compte lors de la conception d’applications car elle peut augmenter considérablement le risque de blessure comme nous l’avons montré dans notre section d’état de l’art sur la fatigue musculaire (Section 2.4.1). Cependant, il y a un manque dans la littérature d’études qui se focalisent sur la différence de fatigue produite par l’interaction en mid-air avec une ou deux mains dans un environnement RV. C’est ce que nous voulons surmonter avec notre étude. Cela permettra de comprendre l’influence de ce paramètre sur la fatigue et ainsi d’informer la conception de jeux et d’applications permettant des sessions plus longues, en limitant l’inconfort et le risque de blessure pour les utilisateurs.

Au regard de ce que pourrait apporter l’étude de la synchronisation des mains, nous soulevons, les questions suivantes auxquelles répondent nos quatre expériences :

- L’orientation de l’écran tactile étant un facteur impactant la fatigue musculaire, nous nous demanderons si la direction du mouvement de la main dans l’espace 3D impacte la fatigue perçue. Pour répondre à cela dans les expériences 1 et 3 nous imposerons aux participants sept différentes directions de mouvement testées sur des périodes de deux minutes lors d’une tâche de pointage répétitive.
- Aussi, il semblerait que la synchronisation et le nombre de mains utilisées impactent la difficulté perçue, les performances et les préférences des utilisateurs mais impactent-ils également la fatigue perçue ? Nous proposons donc

- d'essayer différentes synchronisations de mains lors des expériences 1 et 3.
- Par ailleurs, nous pensons qu'il pourrait être intéressant d'observer les stratégies de synchronisation des mains pour minimiser la fatigue que choisiraient les participants si nous les laissions libres de cette contrainte. Nous avons donc conçu les expériences 2 et 4 qui consistent comme les 1 et 3 en une tâche de pointage répétitive mais cette fois sur une seule direction testée sur 10 minutes et durant laquelle, les participants peuvent utiliser leurs mains comme ils l'entendent.
 - En constatant que selon la tâche à effectuer, les conséquences de la synchronisation et du nombre de mains sur les performances et la difficulté perçue changeaient, nous nous sommes demandé si deux tâches différentes pourraient favoriser des stratégies d'utilisation des mains différentes. Les expériences 3 et 4 viennent donc compléter les expériences 1 et 2 dans ce sens. Effectivement, pour la première et la deuxième expérience, nous proposons un exercice de pointage simple (*i.e.*, une seule de ligne de cibles à pointer séquentiellement) alors que pour les expériences 3 et 4, il s'agit d'une tâche de pointage composite (*i.e.*, deux lignes de cibles à pointer séquentiellement). En imposant l'utilisation de deux mains sur la tâche de pointage simple, nous considérons que cela accroîtrait la charge cognitive, puisque cela devrait requérir de planifier et trier des décisions pour coordonner les deux mains entre elles [135] ce qui favoriserait donc les conditions à une main qui pourraient demander moins d'effort. Pour l'exercice de pointage composite, nous pensons que malgré que l'utilisation des conditions à deux mains augmenterait la charge cognitive, elles pourrait nécessiter moins d'effort pour être accomplie par rapport aux conditions à une main. Comme nous imposons à l'utilisateur d'utiliser ses mains dans la ligne la plus proche de celles-ci, elles auraient chacune moins de distance à parcourir pour réaliser les essais que lorsqu'elles sont utilisées dans les conditions à une main et nous pensons que cela pourrait réduire la fatigue perçue lors de la tâche.
 - Enfin nous nous demanderons pour les tâches composites si l'écartement entre les deux zones d'interaction influence la fatigue comme le fait la taille d'un écran tactile. C'est pourquoi nous choisissons d'étudier également ce paramètre lors des expériences 3 et 4.

3.2 État de l'Art : Interactions à Une Main et à Deux Mains

Les synchronisations des mains et l'utilisation d'une ou de deux mains pour interagir ont été le centre d'intérêt de plusieurs recherches en IHM et leurs effets sur les performances et sur le ressenti de l'utilisateur ont été explorées dans diverses

3.2. *ÉTAT DE L'ART : INTERACTIONS À UNE MAIN ET À DEUX MAINS*

situations et sous de nombreux angles.

Une première approche est centrée sur la demande d'attention, lors des interactions tactiles et tangibles, sous différentes conditions de synchronisation des mains [135]. Rekik et al. [135] ont conclu que la demande d'attention est plus faible en utilisant uniquement la main dominante qu'en utilisant deux mains synchronisées ou alternées. Cependant, ils ont également constaté que la condition à deux mains synchronisées était plus rapide que les deux autres conditions.

Huang et al. [78] ont également travaillé sur des appareils tactiles mais ici ils s'intéressent à l'efficacité d'une technique d'interaction à une main avec un grand écran via un smartphone et d'une technique d'interaction à deux mains avec le même écran et utilisant le smartphone plus un objet tangible dans la seconde main. Ils ont conclu que la méthode à deux mains était beaucoup plus précise que la première.

En plus de l'interaction tactile, Kin et al. [95] ont étudié les performances lors de l'interaction sur un menu circulaire ou Marking Menu avec 1HR "une main droite", 1HL "une main gauche", 2HS "deux mains simultanées" et 2HO "deux mains ordonnées". Ils ont conclu que pour les interactions à deux mains, la planification du mouvement des doigts était plus lente que pour les interactions à une main, mais que cela pouvait être amélioré en entraînant et en développant la mémoire musculaire. D'autres conclusions de cette étude étaient que 2HS "était plus rapide que les conceptions à une main et exécuté avec une précision raisonnable" et que 2HO "doublait le nombre d'éléments de menu accessibles."

Enfin, Chaconas et Höllerer [39] ont présenté les différences entre les techniques d'interaction à une et à deux mains en RA (réalité augmentée) en fonction de l'efficacité, de la précision et des préférences des utilisateurs. Pour l'efficacité et la précision, les différentes techniques présentées étaient équivalentes, mais l'une des techniques à deux mains était préférée par les utilisateurs. Ils n'ont pas étudié la fatigue, mais à travers des entretiens, ils ont souligné qu'il s'agissait d'un point qui mériterait de plus amples investigations.

Comme nous venons de le voir, les interactions à une et à deux mains sembleraient présenter de nombreuses différences. L'interaction à deux mains pourrait être plus difficile à utiliser (plus exigeante), mais elle pourrait permettre d'exécuter les tâches plus rapidement et avec plus de précision qu'une interaction à une main et elle pourrait même être préférée par les utilisateurs. Cependant, parfois, selon les utilisateurs et les cas d'utilisation, ces différentes interactions seraient comparables en termes d'efficacité ou de précision. Pour conclure, les différences de fatigue des bras entre les synchronisations des mains lors des interactions en mid-air n'ont pas encore été étudiées, malgré les opportunités qu'elles ouvrent, à savoir, concevoir des applications moins fatigantes et utilisables sur de plus longues durées en réduisant le risque de blessures. Dans ce chapitre, nous étudions l'effet des interactions à une

et à deux mains sur la fatigue perçue du bras.

3.3 Expérience 1 : Synchronisation de Mains Contrôlée pour une Tâche de Pointage Simple

Nous avons mené une première expérience pour comparer différentes synchronisations des mains en terme de fatigue perçue sur le bras et en terme de performances, lors d'un exercice de pointage simple (*i.e.*, une seule de ligne de cibles à pointer séquentiellement) dans un environnement de RV. Nous considérons que cette tâche pourrait accroître la charge cognitive, en particulier lorsque deux mains sont utilisées puisque cela requiert de planifier et trier des décisions pour coordonner les deux mains entre elles [135]. De plus, nous nous intéressons surtout à l'impact de la synchronisation des mains sur la fatigue des bras plutôt que sur les performances. Nous espérons déterminer quelles synchronisations et quelles directions provoquent plus de fatigue que les autres pour accomplir la tâche. Par conséquent, cette tâche était à réaliser de façon répétée pendant deux minutes pour chaque combinaisons de synchronisations et de directions du mouvement.

3.3.1 Participants

Nous avons dix participants (tous des hommes) volontaires pour prendre part à notre expérience. Ils étaient âgés entre 18 et 39 ans (moyenne=26.5, s.d=6). Tous les participants étaient droitiers. Cinq d'entre-eux avaient l'habitude d'utiliser fréquemment des interactions gestuelles en mid-air (*p.ex.*, Wiimote, PS Move, Kinect, VR, etc.), quatre autres avaient déjà utilisé de tels gestes au moins deux fois et le dernier disait n'en avoir jamais employé.

3.3.2 Équipement

Cette expérience était effectuée sur le casque de RV **Valve Index** avec : une résolution d'affichage de 1440×1600 pixels par oeil, un taux de rafraîchissement de 120 Hz, un champ de vision d'environ 130 degrés et le système de suivi **SteamVR 2.0**. Selon Niehorster et al. [122] et Graham [67], le système SteamVR est suffisamment précis pour être exploitable dans un contexte de recherche. Les participants étaient assis juste en face d'un pavé virtuel correspondant à un bureau de 56 cm de haut. Ils interagissaient avec l'environnement virtuel en utilisant les manettes **Valve Index Knuckles**, une dans chaque main. Ils étaient également équipés des capteurs de

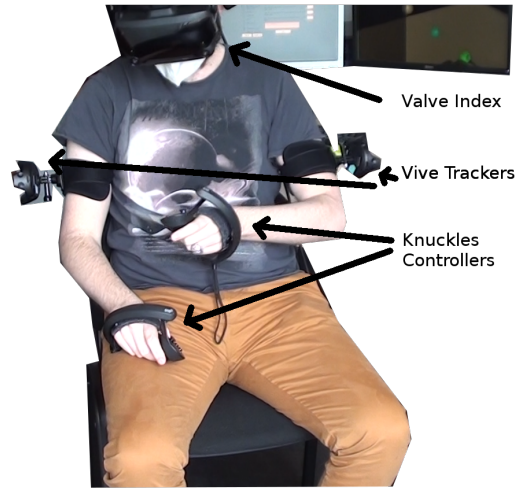


FIG. 3.1 – Un participant assis et complètement équipé avec un casque de RV (le Valve Index) sur la tête, deux manettes de type “Knuckles” en main ainsi que deux HTC Vive Trackers sur les bras.

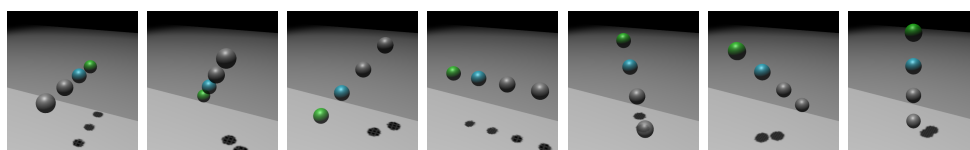
suivis de mouvements de **HTC**, les **Vive Trackers**, sur chaque bras (approximativement au milieu) pour suivre les épaules et les coudes, comme montré dans la Figure 3.1. Dans les analyses des expériences qui suivront, seules les positions des mains seront utilisées. Nous pensions initialement pouvoir utiliser les capteurs sur les bras pour de futurs travaux mais il s’est révélé que les données captées n’étaient pas exploitables pour la plupart des participants. Effectivement, l’installation sur des personnes avec des morphologies différentes ne permettait pas toujours au système d’être suffisamment stable.

En outre, au contraire de la plupart des autres manettes de RV du moment (i.e., en 2019), les Knuckles sont attachées autour de la main et, par conséquent, ne nécessitent plus d’appliquer une force de préhension constante, ce qui pourrait atténuer l’effet de fatigue musculaire sur le bras.

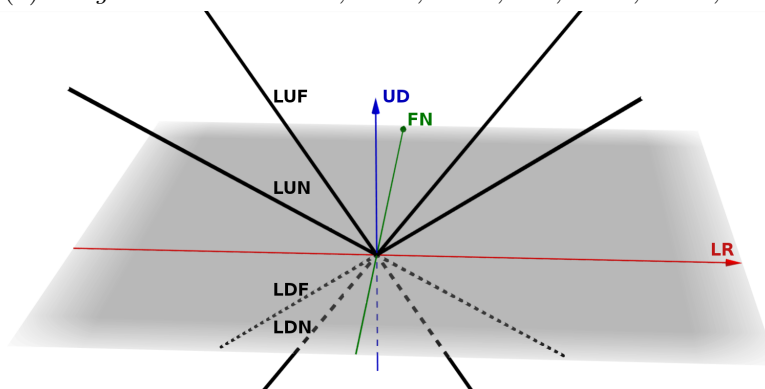
Enfin, l’expérience était implémentée en C# sur **Unity3D**. Nous avons enregistré, à une fréquence de 90Hz, les positions et rotations du casque (tête), des manettes (mains et points associés au poignet et au bout des doigts), des traqueurs (et des positions associées aux points correspondants aux épaules et aux coudes).

3.3.3 Design

L’expérience a utilisé une conception intra-sujets $4 \times 7 \times 8$ pour les facteurs : *synchronisations des mains*, *directions* et *périodes de temps*.



(a) De gauche à droit : FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN, UD.



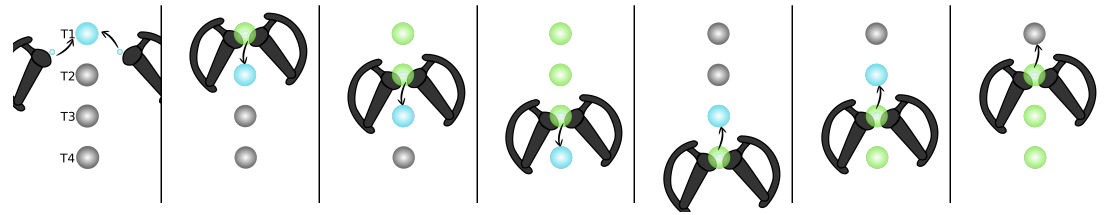
(b) En vert l'axe antéropostérieur, en rouge l'axe transversal, en bleu l'axe longitudinal et en noir les diagonales.

FIG. 3.2 – Les 7 directions utilisées dans nos expériences. Avec en (a) une représentation de ce que peut voir l'utilisateur, en (b) une représentation schématique.

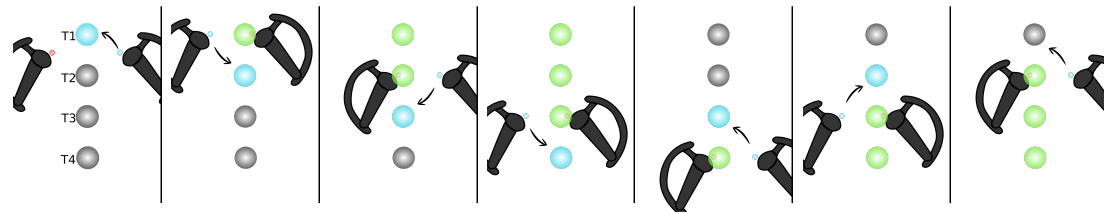
Pour la variable indépendante primaire *synchronisation des mains*, nous avons testé quatre conditions différentes couvrant les mains utilisées et leur synchronicité pour accomplir la tâche de pointage séquentiel : *1HR* : mouvements séquentiels avec la main droite, *1HL* : mouvements séquentiels avec la main gauche, *2HT* : mouvements avec les deux mains ensembles et *2HO* : mouvements ordonnés à deux mains.

Pour la deuxième variable indépendante *direction*, qui dans cette expérience correspond aux sept différentes directions de mouvement que nous affichons sur la Figure 3.2 : *UD* : Haut-Bas ou axe longitudinal ou direction verticale, *LR* : Gauche-Droite ou axe transversal, *FN* : Proche-Loin ou axe antéropostérieur, *LDF* : de Gauche-Bas-Loin à Droite-Haut-Proche (correspondant à un mouvement entre le genou gauche et l'épaule droite), *LDN* : de Gauche-Bas-Proche à Droite-Haut-Loin (correspondant à un mouvement entre le côté gauche du bassin vers un emplacement approximativement devant l'épaule droite et au-dessus du genou droit, cela correspond à l'extension maximale que nous demanderons pour la main gauche), *LUF* : de Gauche-Haut-Loin à Droite-Bas-Proche (correspondant à un mouvement entre le côté droit du bassin vers un emplacement approximativement devant l'épaule gauche et au-dessus du genou gauche, il correspond à la extension maximale que nous demanderons pour la main droite), *LUN* : de Gauche-Haut-Proche à Droite-Bas-Loin (correspondant à un mouvement entre le genou droit et l'épaule gauche). Ces directions sont placées sur une sphère dont le centre est placé à 44 cm du buste du

3.3. XP1 : SYNCHRONISATION CONTRÔLÉE SUR TÂCHE SIMPLE



(a) Voici la séquence de cible à suivre pour les conditions 1HR, 1HL et 2HT. Pour la condition 1HR (respectivement 1HL), le participant n'avait qu'à utiliser la main droite (respectivement la main gauche) pour valider la cible.



(b) Voici la séquence de cibles à suivre pour la condition 2HO. Le participant devait utiliser le contrôleur actif pour valider la cible (le bleu). Pour la condition 2HO, le participant devait utiliser la main droite pour la première cible (T1), puis la main gauche pour T2, puis la main droite pour T3, puis la main gauche pour T4, puis la main droite pour T3, puis la main gauche pour T2 pour terminer un essai.

FIG. 3.3 – Les deux types de séquences pour la tâche de sélection de cibles avec les différentes conditions de main.

participant et à une hauteur de 70 cm. Le diamètre de cette sphère est de 50 cm. Nous avons basé ces valeurs sur les dimensions moyennes du corps humain masculin [112, 5].

Pour la troisième variable indépendante *temps*, nous considérons huit périodes de temps successives : 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90, 90-105 et 105-120 secondes (nous nous référerons à ces périodes en utilisant leur borne supérieure pour la présentation des résultats). Celles-ci représentent des périodes pendant lesquelles nous avons mesuré les performances des participants et à la fin desquelles les participants sont rappelés par un bip sonore pour estimer leur niveau de fatigue actuel à l'aide de l'échelle Borg CR-10.

3.3.4 Procédure & Tâche

Les participants étaient invités à s'asseoir sur une chaise tout en portant le casque de réalité virtuelle, les manettes et les traqueurs. Sur chacun de deux derniers appareils des petites sphères virtuelles étaient associées et pouvaient être déplacées par le participant qui devaient les placer au niveau de l'épaule et du coude correspondant

au bras où était attaché le traqueur.

La tâche consistait en le pointage de cibles sphériques de 5 cm de diamètre à réaliser aussi rapidement et précisément que possible. Chaque essai était composé d'une séquence de six cibles avec une *cible de départ* (t1) et une *cible de fin* (t2). Comme le montre la figure 3.3, il y avait une séquence de quatre cibles alignées (t1, t2, t3, t4) et les participants devaient les pointer séquentiellement dans l'ordre suivant : t1, puis t2, t3, t4 , t3 et enfin t2 pour terminer l'essai.

Chaque essai commençait après que la cible de départ (t1) était sélectionnée avec succès et se terminait avec la sélection de la cible de fin (t2). Au début d'un essai, la cible de départ était active et bleue tandis que les autres cibles étaient inactives et grises. Lorsqu'une seule main était nécessaire pour valider la cible, si la bonne main était à l'intérieur de la cible à sélectionner, la cible passait au vert et si la mauvaise main était à l'intérieur, la cible devenait rouge et l'essai était réinitialisé. Lorsque deux mains étaient nécessaires pour valider la cible, si les deux mains étaient dans la cible, elle devenait verte, si une main était à l'intérieur de la cible, elle devenait jaune jusqu'à ce que la deuxième main entre aussi, si la main était retirée avant que l'autre ne soit à l'intérieur de la cible, l'essai était réinitialisé. Si la cible était validée et qu'elle passait au vert, la prochaine cible à sélectionner devenait active et passait au bleu. Si l'essai était réinitialisé, cela signifiait que la condition des mains n'avait pas été respectée (*i.e.*, deux mains pas simultanément dans la cible pour *2HT* ou mauvaise main dans la séquence pour *1HR*, *1HL* et *2HO*) et donc une erreur était comptabilisée. Après avoir sélectionné et validé les quatre premières cibles (t1-t4), *i.e.*, les participants atteignaient la fin de la ligne, t1 et t2 devenaient gris tandis que t3 virait au bleu et devenait actif.

Dans la condition de mouvements séquentiels de la main droite *1HR*, les participants devaient effectuer la séquence de tâches de pointage en utilisant uniquement leur main droite tandis que pour les mouvements séquentiels *1HL* de la main gauche, les participants devaient utiliser leur main gauche (voir Figure 3.3a). Pour la condition de mouvement simultané à deux mains *2HT*, les participants étaient invités à utiliser leurs deux mains simultanément pour sélectionner séquentiellement les différentes cibles, tout en sélectionnant une cible à la fois (voir Figure 3.3a). Pour la condition de mouvements ordonnés à deux mains *2HO*, les participants étaient invités à sélectionner les cibles de manière séquentielle tout en alternant les mains en suivant un certain ordre : une fois la cible actuelle sélectionnée avec succès à l'aide de la première main, le participant pouvait sélectionner la cible suivante à l'aide de la seconde main (voir Figure 3.3b). Pour avoir la même configuration pour tous les participants, la première cible devait être sélectionnée par la main dominante (ici la main droite). Le nombre de mains et leur synchronicité étaient des contraintes fixes qui devaient être respectées pendant tout l'essai.

3.3. XP1 : SYNCHRONISATION CONTRÔLÉE SUR TÂCHE SIMPLE

Avant de commencer l'expérience principale, les participants étaient invités à effectuer un test d'effort, similaire à l'exercice isométrique proposé par Jang et al. [81], afin qu'ils puissent se familiariser avec l'échelle Borg CR-10. En plus de l'équipement et de l'installation décrits précédemment, les participants portaient un bracelet de 2.5kg sur chaque avant-bras/poignet. Deux cibles étaient ensuite affichées dans l'environnement virtuel, une pour chaque main, suffisamment grandes (20cm) pour être facilement sélectionnées et placées de sorte que les participants doivent tendre les bras pour les atteindre. Les participants étaient invités à garder leurs mains à l'intérieur des cibles aussi longtemps qu'ils le pouvaient sans ressentir de douleur. Toutes les 15 secondes, un bip était émis, auquel les participants devaient répondre en donnant leur niveau de fatigue selon l'échelle Borg CR-10, qui leur était rappelée plusieurs fois. Cette phase a été évaluée un jour avant le début de l'expérience principale car nous voulions que le participant se repose un minimum avant de démarrer la phase suivante afin d'éviter de la commencer avec un niveau de fatigue fortement élevé.

Dans la phase d'expérimentation, les quatre conditions de synchronisation des mains étaient présentées dans un ordre aléatoire aux participants. De plus, comme nous étions concernés par la perception de la fatigue du bras par l'utilisateur, chaque condition de synchronisation était évaluée un jour différent. À l'intérieur de chaque synchronisation de main, les participants effectuaient 14 minutes de la tâche de pointage. Toutes les 2 minutes, les participants évaluaient une nouvelle direction, avec une pause entre chaque direction pour diminuer et idéalement éviter l'accumulation de fatigue. Les participants pouvaient commencer la direction suivante lorsqu'ils se sentaient complètement rétablis (niveau de fatigue "*extrêmement faible*" ou "*très faible*"). Notre logiciel présentait dans un ordre aléatoire les 7 directions à nos participants – un total de 224 périodes de temps de 15 s (4 synchronisations des mains \times 7 directions \times 8 périodes de temps de 15 s).

Après chaque période de 15 s, un bip était émis pour rappeler aux participants d'évaluer leur perception de la fatigue des bras droit et gauche en fonction des niveaux de l'échelle de Borg CR10 [76, 28]. Cette échelle fournit une mesure de l'effort physique dont les valeurs correspondent à des ancres verbales. Les valeurs de Borg CR10 vont de 0 à 10, où 0 correspond à "*rien du tout*", 0.5 à "*extrêmement faible*", 1 à "*très faible*", 2 à "*faible*", 3 à "*modéré*", 5 à "*fort*", 7 à "*très fort*" et 10 à "*extrêmement fort*"(Maximal) [76, 28].

Si les participants n'avaient pas terminé l'essai en cours avant la fin d'une période de 15 s, cet essai était compté dans les 15 s suivantes. Si les 2 minutes se arrivaient à terme alors qu'un essai n'était pas encore fini, l'exercice s'arrêtait mais cet essai n'était pas pris en compte. À la fin de chaque direction et de chaque condition de synchronisation des mains, les participants pouvaient expliquer leur évaluation de la fatigue, *i.e.*, ce qu'ils avaient trouvé moins fatigant pour chaque condition de tâche.

En moyenne, l'expérience durait 120 minutes, réparties en quatre séances sur quatre jours consécutifs.

3.4 Résultats de l'Expérience 1 - Contrôlée

Nos résultats incluent le niveau d'accord entre les participants en termes de fatigue perçue, de mesures de performance et d'observations qualitatives.

3.4.1 Consensus entre Utilisateurs sur la Fatigue Perçue

Nous nous intéressons dans cette section au niveau d'accord entre les participants en termes de fatigue perçue lors de la tâche de pointage séquentiel dans un environnement virtuel. En particulier, nous avons analysé la fatigue perçue du bras droit et la fatigue perçue du bras gauche. À cette fin, nous rapportons et analysons 4480 (2 (fatigue du bras droit et fatigue du bras gauche) $\times 4$ synchronisations $\times 7$ directions $\times 8$ périodes de temps) évaluations individuelles de fatigue absolue recueillies auprès de 10 participants.

Fatigue du bras droit

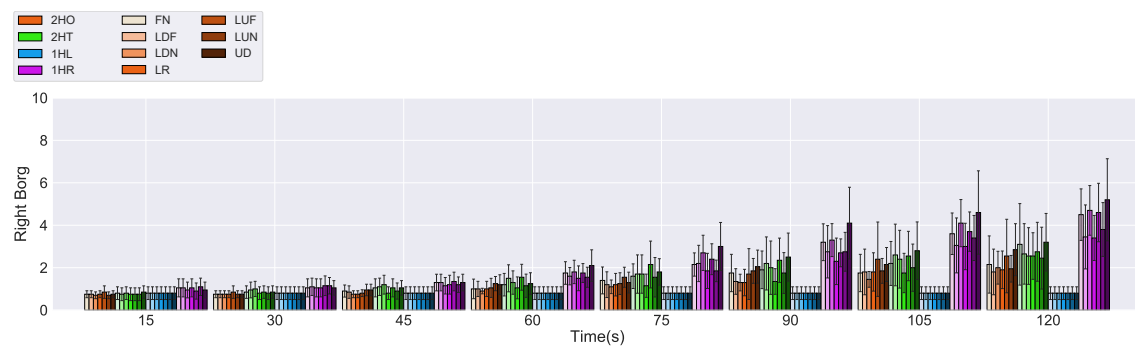
La Figure 3.4a illustre les évaluations par les participants de la fatigue du bras droit perçue lors de la tâche de pointage séquentiel avec *1HR*, *1HL*, *2HO* et *2HT*. Dans l'ensemble, nous avons trouvé un degré modéré de concordance entre les réponses des participants, comme en témoigne le coefficient de concordance de Kendall¹ lors de l'évaluation de la fatigue de leur bras droit ($W = .523$, $\chi^2(224) = 1072$, $p < .0001$) pendant l'expérience. Cependant, les coefficients de Kendall sont restés supérieurs à $.50$, ce qui montre de grandes tailles d'effet Cohen². Ces résultats indiquent que le niveau de fatigue du bras droit est perçu par les personnes de manière cohérente, ce qui justifie une enquête plus approfondie.

Le niveau de concordance est également resté modéré lorsque nous avons effectué l'analyse pour les conditions *1HR*, *2HO* et *2HT* ($.479 < W < .584$) et sans surprise,

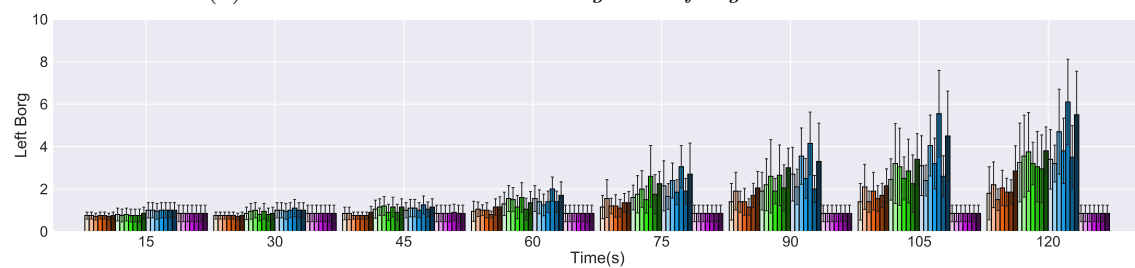
1. Le coefficient de concordance de Kendall est une normalisation de la statistique du test de Friedman utilisé pour évaluer la continuité du jugement entre plusieurs individus. W prend des valeurs dans $[0 \dots 1]$, où 0 indique aucun accord et 1 accord parfait [91].

2. Le coefficient W de Kendall est lié à la moyenne de $\binom{n}{2}$ Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les paires de n classements [91] (p. 276). Par conséquent, nous utilisons les limites suggérées par Cohen de $.10$, $.30$, and $.50$ pour interpréter l'ampleur de la taille de l'effet [43].

3.4. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 1 - CONTRÔLÉE



(a) Niveau sur l'échelle de Borg de la fatigue du bras droit.



(b) Niveau sur l'échelle de Borg de la fatigue du bras gauche.

FIG. 3.4 – Valeurs moyennes de la fatigue perçue par l'utilisateur du bras droit (a) et du bras gauche (b) mesurées en fonction d'évaluation absolue de la synchronicité des mains (2HT, 2HO, 1HL et 1HR) et les directions du mouvement (FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN et UD).

les participants étaient parfaitement d'accord pour noter *1HL* ($W = 1$). Le degré de consensus entre les participants est resté modéré lorsque nous avons effectué l'analyse pour chaque direction de mouvement ($.537 < W < .611$). Lors du calcul de l'accord pour chaque condition de période de temps, nous avons constaté que plus le temps avançait, plus le degré de consensus entre les participants était élevé, les coefficients W de Kendall variant de .378 à .616.

Nous avons également effectué des tests ANOVA à mesures répétées pour déterminer s'il y avait un effet de la synchronicité des mains, de la direction du mouvement et de la période de temps sur la fatigue perçue et où les différences peuvent se situer.

Il y avait des effets principaux statistiquement significatifs de *synchronisation* ($F_{3,27} = 9.42, p < .0001$) et *période* ($F_{7,63} = 22.85, p < .0001$) sur la *fatigue du bras droit*. Nous avons également des interactions significative: *synchronisation* \times *période* ($F_{21,189} = 10.20, p < .0001$) et *direction* \times *période* ($F_{42,378} = 1.87, p = .0017$).

Des tests post-hoc ont révélé que *1HR* était jugé significativement plus fatigant que *1HL*, *2HO* et *2HT* respectivement de 75 s-120 s, 90 s-120 s et 120 s de l'exercice ($p < .05$).

Nous avons également constaté que lors de l'utilisation de *1HR*, les périodes de 75 s, 90 s, 105 s et 120 s étaient significativement plus fatigantes que respectivement les trois premières périodes (15 s-45 s), les quatre premières périodes (15 s-60 s), les cinq premières périodes (15 s-75 s) et toutes les périodes restantes (15 s-105 s) ($p < .05$). Nous avons aussi trouvé que *1HL* était significativement moins fatigant que *2HT* et *2HO* pour respectivement les deux dernières périodes de temps (105 s et 120 s) et la dernière période de temps (120 s) ($p < .05$).

De plus, nous avons constaté qu'en utilisant *2HO*, les périodes de 105 s et 120 s étaient notées significativement plus fatigantes que respectivement les trois premières périodes (15 s-45 s) et les quatre premières périodes de temps (15 s-60 s) ($p < .05$). Enfin, lors de l'utilisation de *2HT*, les périodes de 90 s, 105 s et 120 s ont été jugées significativement plus fatigantes que respectivement la première période (15 s), les quatre premières périodes (15 s-60 s) et les cinq premières périodes (15 s-75 s) ($p < .05$).

Fatigue du bras gauche

La Figure 3.4b illustre les évaluations par les participants de la fatigue perçue du bras gauche lors de la tâche de pointage séquentiel avec *1HR*, *1HL*, *2HO* et *2HT*. De la même manière que pour la fatigue du bras droit, nous avons trouvé un degré modéré de consensus entre les évaluations des participants sur la fatigue du bras gauche ($W = .511, \chi^2(224) = 1042, p < .0001$). Lors du calcul de l'accord

3.4. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 1 - CONTRÔLÉE

pour chaque condition de synchronicité des mains, les coefficients W de Kendall sont restés au-dessus de .5 ($.513 < W < .69$) avec un niveau très élevé pour *1HR* ($W = .921$). Le degré de consensus entre les participants est resté modéré lorsque nous avons effectué l'analyse pour chaque direction de mouvement ($.515 < W < .6$). De plus, nous avons constaté que plus la période de temps est longue, plus le degré de consensus entre les participants est élevé avec des coefficients W de Kendall allant de .38 à .675.

L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet statistiquement significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 7.68, p = .0007$), *direction* ($F_{6,54} = 4.87, p = .0005$) et *période* ($F_{7,63} = 17.13, p < .0001$) sur la *fatigue du bras gauche*. Et nous trouvons également les interactions suivantes: *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 2.83, p = .0003$), *synchronisation* \times *période* ($F_{21,189} = 11.19, p < .0001$) et *direction* \times *période* ($F_{42,378} = 3.52, p < .0001$) et *synchronisation* \times *direction* \times *période* ($F_{126,1134} = 2.45, p < .0001$).

Des tests post-hoc ont révélé que *1HL* est jugé significativement plus fatigant que *2HO* lors du déplacement des mains dans les directions LDF, LDN, LUF et UD pour respectivement la dernière période de temps (120 s), la dernière période de temps (120 s), les trois dernières périodes de temps (90 s-120 s) et les deux dernières périodes de temps (105 s-120 s). De plus, pour les deux dernières périodes de temps (105 s et 120 s), *1HL* est jugé significativement plus fatigant que *2HT* lors du déplacement des mains dans le sens LUF ($p < .05$). Pour les deux dernières périodes de temps (105 s et 120 s), *1HL* est également notée significativement plus fatigante que *1HR*.

Nous avons également constaté qu'en utilisant *1HL*, pour toutes les directions, les trois dernières périodes de temps sont perçues significativement plus fatigantes que les quatre premières périodes de temps ($p < .05$). De plus, lors de l'utilisation de *1HL*, pour les deux dernières périodes de temps, le déplacement des mains dans le sens LUF est jugé significativement plus fatigant que lors du déplacement des mains dans les sens FN, LDF, LDN, LR et LUN ($p < .05$).

Pour la synchronisation de deux mains ordonnées *2HO* avec les mains qui suivent la direction UD, la dernière période de temps (120 s) est notée significativement plus fatigante que les trois premières périodes de temps (15 s-45 s) ($p < .05$).

Lors de l'utilisation de *2HT*, pour toutes les directions, les dernières périodes de temps (90 s-120s) ont été notées significativement plus fatigantes que les premières périodes de temps (15 s-60 s) ($p < .05$). De plus, pour la dernière période de temps (120 s), *2HT* est jugé significativement plus fatigant que *1HR* lors du déplacement des mains dans les directions LDN, LR et UD ($p < .05$).

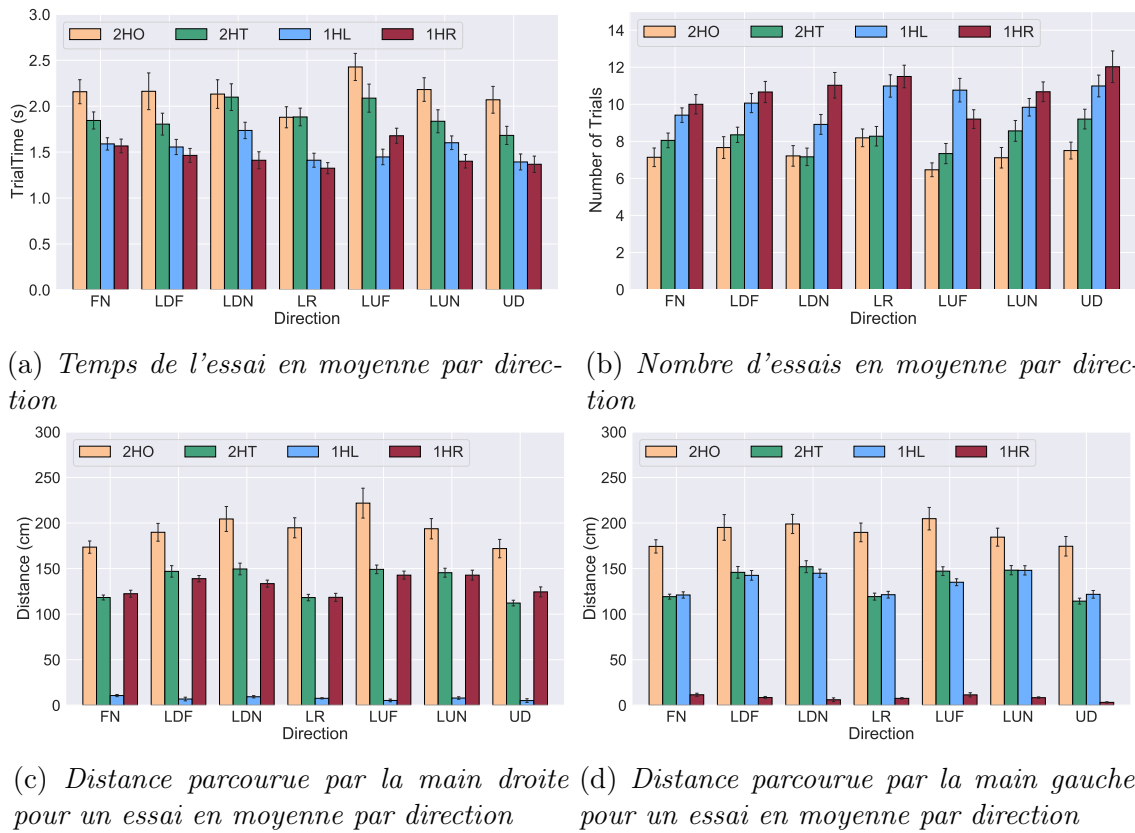


FIG. 3.5 – Expérience 1 – Résultats pour chaque mesures dépendantes.

3.4.2 Performances des Utilisateurs

Cette section fournit les résultats des tests statistiques pour les variables dépendantes *temps de l'essai*, *nombre d'essais*, *distance de la main droite* et *distance de la main gauche*. Toutes les analyses sont des multi-way ANOVA. Les tests post-hoc de Tukey sont utilisés lorsque des effets significatifs sont trouvés.

Temps d'essai

Le *temps d'essai* est mesuré comme l'intervalle entre la sélection de la première cible et la sélection de la dernière cible dans la séquence des six cibles.

L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet principal significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 13,11, p < .0001$) et *direction* ($F_{6,54} = 6.02, p < .0001$) sur le *temps d'essai* avec l'interaction *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 2.24, p = .0041$). Des tests post-hoc ont montré que *2HO* est significativement plus lent que *1HR* (respectivement, *1HL*) lors du déplacement des mains sur les directions LDF, LDN,

3.4. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 1 - CONTRÔLÉE

LUF, LUN et UD (respectivement, LDF, LUF et UD) ($p < .05$). De même, nous avons trouvé que *2HT* est significativement plus lent que *1HR* et *1HL* pour respectivement les directions LUF et LDN ($p < .05$) (voir Figure 3.5a).

Nombre d'essais

Le *nombre d'essais* correspond au le nombre d'essais effectués sans erreurs commises à l'intérieur d'une période de temps de 15 s.

L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 19.92$, $p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 8.39$, $p < .0001$) et *période* ($F_{7,63} = 22.68$, $p < .0001$) sur le *nombre d'essais* avec l'interaction *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 2.97$, $p = .0001$). Les tests post-hoc ont montré que l'utilisation de *1HR* implique significativement plus d'essais que lors de l'utilisation de *2HT* (respectivement, *2HO*) lors du déplacement de la ou des mains dans les directions suivantes FN, LDN, LR, UD (respectivement, les sept directions). Utiliser *1HL* (respectivement *1HR*) avec la direction LDN (respectivement LUF ou FN) implique significativement moins d'essais qu'avec les directions LR ou UD (respectivement LR ou UD) (voir Figure 3.5b).

Distance d'essai

La *distance d'essai* représente la moyenne sur une période de 15 s des distances parcourues, lors d'un essai par la main droite ou gauche, *i.e.* de la sélection de la première cible à la sélection de la dernière cible dans la séquence des six cibles. On distingue la distance parcourue par la main droite et la main gauche.

Distance parcourue par la main droite pour un essai. L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 140.19$, $p < .0001$) et *direction* ($F_{6,54} = 21.11$, $p < .0001$) sur la *distance de la main droite* avec l'interaction *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 4.23$, $p < .0001$). Sans surprise, les tests post-hoc ont révélé que *1HL* (*moyenne* = 7.55cm, *sd* = 0.57cm) produisait des distances significativement plus courtes que les autres conditions de synchronicité des mains (*2HO* : *moyenne* = 192.87cm, *sd* = 4.55cm ; *2HT* : *moyenne* = 134.25cm, *sd* = 2.2cm et *1HR* : *moyenne* = 131.89cm, *sd* = 1.85cm) ($p < .05$). Ce résultat suggère que la main gauche effectue un petit mouvement même si ce n'est pas la main utilisée. Cependant, de manière intéressante, nous avons constaté que *2HO* produisait une distance significativement plus longue que *2HT*, *1HR* et *1HL* ($p < .05$). De plus, nous avons constaté que lors de l'utilisation de *2HO*, la direction LUF (respectivement LDF) produisait des distances significativement plus longues que les

directions FN, LDF, LR, LUN et UD (respectivement FN et UD). Lors de l'utilisation de *2HT*, les directions LDF, LDN, LUF et LUN produisaient des distances significativement plus longues que les directions FN, LR et UD (voir Figure 3.5c) ($p < .05$).

Distance parcourue par la main gauche pour un essai. L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 169.28$, $p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 19.43$, $p < .0001$) sur la *distance main gauche* avec l'interaction *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 3.96$, $p < .0001$). Comme pour la distance de la main droite et sans surprise, les tests post-hoc ont révélé que, pour toutes les directions, *1HR* (*moyenne* = 8.08cm, *sd* = 0.60cm) produisait une distance significativement plus courte que toutes les synchronisations restantes (*1HL*: *moyenne* = 133.51cm, *sd* = 1.87cm, *2HT*: *moyenne* = 135.14cm, *sd* = 2.22cm et *2HO*: *moyenne* = 188.85cm, *sd* = 4.19cm) ($p < .05$). Aussi, *2HO* a produit des distances significativement plus longues que *2HT* et *1HL* pour toutes les directions à l'exception des directions LUN. Nous avons également constaté qu'en utilisant *1HL*, les directions FN, LR et UD produisaient des distances significativement plus courtes que les directions LDN et LUN ($p < .05$). De plus, nous avons observé que lors de l'utilisation de *2HO*, les directions FN et UD produisaient des distances significativement plus courtes que les directions LR et LUF ($p < .05$). Enfin, lors de l'utilisation de *2HT*, les directions FN, LR et UD ont produit des distances significativement plus courtes que les directions LDF, LDN, LUF et LUN ($p < .05$) (voir Figure 3.5d).

3.4.3 Corrélations entre Performances & Fatigue Perçue

Nous avons calculé la corrélation de Spearman entre les différentes mesures de performances des utilisateurs et la fatigue perçue par les participants pour le bras droit et le bras gauche. Essentiellement, s'il existe une corrélation avec une ou plusieurs mesures, alors ces mesures peuvent être considérées comme un indicateur de fatigue du bras. Le nombre d'essais est spécifique à nos tâches et ne peut être considéré comme un indicateur de fatigue ce qui est confirmé par la corrélation de Spearman ($-0.1 < r < .1$). À l'inverse, la distance parcourue et le temps sont des caractéristiques intéressantes pour les mouvements des bras. Nous sommes également intéressés par la capture de l'évolution du mouvement du bras au cours de l'expérience. Pour cela, nous avons proposé trois variantes pour le calcul de la distance parcourue et deux variantes pour le calcul du temps, et nous désignons ces variations par respectivement *essai*, *période* et *cumul*. Par exemple, la "distance essai droite" correspond à la moyenne de la distance parcourue pour un essai par la main droite pendant une période de temps correspondante. Alors que la "distance période

3.4. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 1 - CONTRÔLÉE

Descripteurs	Descriptions
Dist. Essai Dist. Essai R Dist. Essai L	Moyenne sur une période de 15 s des distances parcourues, lors de l'exécution d'un essai, respectivement par la ou les main(s) droite (R) et gauche (L).
Dist. Période Dist. Période R Dist. Période L	Distance parcourue, pendant une période de 15 s, respectivement par la ou les main(s) droite (R) et gauche (L).
Dist. Cumulée Dist. Cumulée R Dist. Cumulée L	Distance parcourue, depuis le début de la tâche, respectivement par la ou les main(s) droite (R) et gauche (L).
Temps Essai	Moyenne sur une période de 15 s du temps d'achèvement de l'essai.
Temps Cumulé	Temps passé depuis le début de la tâche.

TAB. 3.1 – *Descripteurs des mouvements des bras utilisés dans cette étude.* NOTE : cet ensemble de descripteurs a été calculé à partir des données brutes de cette expérience qui sont échantillonnées à 90 Hz puis ré-échantillonnées sur des périodes de 15 s

<i>Cumul</i>	Global		1HR		1HL		2HT		2HO	
	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L
Borg (B.)										
Distance	.294	.290	.566	-.058	-.036	.498	.381	.482	.338	.324
Dist. R	.482	-.064	.572	-.048	.133	.274	.380	.481	.331	.319
Dist. L	-.112	.460	.387	-.140	-.027	.503	.383	.485	.344	.327
Temps	.352	.356	.672	-.002	.000	.584	.390	.503	.446	.433

TAB. 3.2 – *Résultats des corrélations.*

droite” représente la distance totale parcourue par la main droite pendant la période de temps 15 set enfin la “distance cumulée droite” mesure la distance parcourue par la main droite depuis le début de la première période de temps jusqu’à la fin de la période en cours. Dans le tableau 3.1, nous fournissons une description pour chaque descripteur. Nous avons ensuite basé notre analyse de ces corrélations sur l’échelle recommandée par JASP [66].

Dans l’ensemble, nous avons trouvé une corrélation modérée entre le temps cumulé et la fatigue perçue du bras droit ($r = .352$, $p < .001$) et du bras gauche ($r = .356$, $p < .001$). Nous avons également trouvé une corrélation modérée entre la distance cumulée à droite et la fatigue du bras droit ($r = .48$, $p < .001$) et une corrélation modérée entre la distance cumulée du bras gauche et sa fatigue ($r = .46$,

$p < .001$) (voir Tableau 3.2). Pour les descripteurs d'essai et de période, nous avons trouvé des corrélations faibles ou insignifiantes ($-.2 < r < .3$).

En ce qui concerne les corrélations pour chaque condition de synchronicité de mains, nous avons constaté que pour les conditions à une main (1HR et 1HL), il existe une grande corrélation entre la distance cumulée de la main utilisée et la fatigue perçue par le bras correspondant. Nous avons également trouvé une forte corrélation entre le temps et la fatigue perçue par le bras utilisé. Par exemple, pour 1HR, la distance cumulée droite et le temps cumulé étaient corrélés à la fatigue perçue du bras droit. Ceci suggère que plus la distance parcourue à droite/le temps cumulé augmente, plus la fatigue perçue par le bras droit augmente. Pour les conditions à deux mains (2HO et 2HT), nous avons trouvé de petites corrélations entre tous les descripteurs et la fatigue perçue par les deux bras.

3.4.4 Données Qualitatives et Retours Utilisateurs

Dans cette section, nous accompagnons nos données quantitatives de données qualitatives qui, selon nous, fournissent des informations sur les différentes stratégies utilisées pour réduire la fatigue perçue ainsi que des commentaires et préférences des utilisateurs.

Stratégies des utilisateurs pour réduire la fatigue perçue

Pour mieux comprendre les performances des participants, nous rapportons ci-après les différentes stratégies élaborées par les participants afin de réduire la fatigue des bras. Nous avons extrait ces stratégies des commentaires des utilisateurs au cours de l'expérience et aussi de nos observations. Cinq stratégies principales ont été utilisées en fonction de la synchronicité des mains et de la direction du mouvement :

1. **Redresser le buste :** certains participants ont été observés en train de redresser le buste lors de l'exécution de mouvements de haut en bas pour toutes les synchronisations de mains. Nos participants ont estimé qu'avoir une bonne posture du buste était crucial pour réduire leur fatigue. Un participant a déclaré : "atteindre les cibles les plus élevées est compliqué et fatiguant. Ainsi, changer de posture et notamment redresser le buste m'aide à accéder plus facilement et avec moins de fatigue à ces cibles". De plus, un participant a commenté que redresser le buste lors de l'exécution de la tâche avec "le 1HR était plus confortable". Cette stratégie est corrélée aux conclusions de Côté, Fuller et Yang [46, 61, 177].

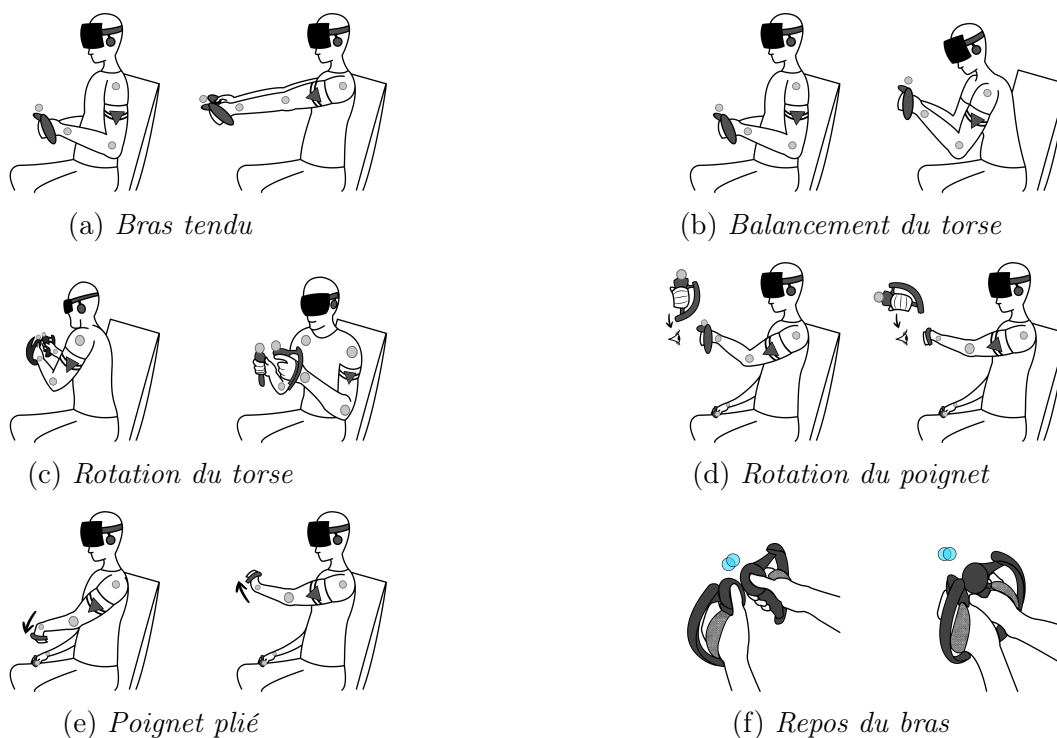


FIG. 3.6 – Illustration schématique des différentes stratégies.

2. **Balancer le haut du corps et le dos** : certains participants balancent leur corps suivant l'axe sagittal pour accomplir les tâches de loin et de près 3.6b. Nos participants ont estimé qu'en agissant ainsi, ils n'avaient pas à trop étendre leurs bras pour accomplir la tâche 3.6a. Un participant a dit : “balancer le torse d'avant en arrière simplifie le mouvement qui rend l'exercice moins fatiguant pour le bras”. Cette stratégie a également été observée dans les travaux précédents [46, 61, 177].
3. **Rotation du torse** : pour la direction gauche-droite (LR), certains participants avaient tendance à pivoter autour de leur axe longitudinal 3.6c pour réduire la fatigue. Ils accompagnaient le mouvement du buste pour éviter une trop grande extension des bras comme pour les stratégies précédentes. Encore une fois, cette stratégie est corrélée aux conclusions de la littérature [46, 61, 177].
4. **Utilisation du poignet** : certains participants ont fait pivoter leur poignet jusqu'à 90° pour réduire la fatigue perçue du bras 3.6d. Un participant a fait valoir qu'en faisant cela, il “utilisait des muscles différents ce qui permettait de reposer les autres et donc de réduire la fatigue globale des bras”. Nous avons également observé que certains participants utilisaient leur poignet pour augmenter l'amplitude de leur mouvement sans impliquer les autres articulations des bras 3.6e. De plus, un participant a utilisé un mouvement circulaire continu

“comme une bobine” pour passer d’une cible à une autre pour la configuration *2HO*.

5. **Soutenir un bras avec l’autre :** cette stratégie est utilisée avec la condition *2HT*. Certains participants ont profité de la proximité de leurs deux mains pour faire reposer l’une sur l’autre de sorte que le mouvement n’était soutenu que par un seul bras (voir Figure 3.6f). De plus, afin de réduire leur fatigue, ils changeaient régulièrement de main.

Commentaires des Utilisateurs sur la Fatigue Perçue

Nous rapportons ici les préférences et les commentaires des utilisateurs sur la fatigue perçue :

- **Préférence pour la main dominante :** tous les participants ont trouvé que l’exercice était plus facile lorsqu’ils utilisaient leur main droite car c’est leur main dominante. Cependant, mais de manière intéressante, nos participants ont estimé qu’avec les autres synchronisations de mains, comme l’exercice est plus difficile, la vitesse de leurs bras diminuait, ce qui diminuait à son tour la fatigue perçue. Par exemple, un participant qui utilisait la condition mains ordonnée *2HO* a dit : “J’ai dû diminuer ma vitesse de déplacement car il est difficile de reprendre le rythme quand on manque une cible”. À l’inverse, un autre participant qui utilisait sa main non dominante *1HL* a déclaré “J’ai l’impression d’être moins précis dans l’utilisation de ma main non dominante. Ainsi, je ralentis mes mouvements par rapport à ma main dominante. Ce qui à son tour diminue ma fatigue”.
- **Préférence pour les directions sur le plan horizontal :** tous les participants ont trouvé que les deux directions sur le plan horizontal (LR et FN) étaient les plus faciles à manipuler et par conséquent moins fatigantes que les directions restantes. Il est important de noter que les directions diagonales (LDF, LDN, LUF et LUN) se sont avérées difficiles à gérer, en particulier lorsque la cible se trouvait du côté opposé au bras utilisé (LUF et LDN). Nos participants ont donc préféré les directions LDF et LUN à celles de LUF et LDN en termes de fatigue perçue. Par exemple, nos participants ont été observés gardant le coude près de leur corps lorsqu’ils se déplaçaient dans les directions LDF et LUN tandis qu’avec LUF et LDN, une extension du bras était nécessaire pour accomplir la tâche, ce qui pouvait exiger plus d’effort physique pour accomplir la tâche. Pour la direction UD, certains participants ont estimé que, bien que cette direction soit plus facile que les directions diagonales, elle était toujours plus fatigante que les directions sur le plan horizontal car elle impliquait les mains en hauteur. Ces résultats corroborent les conclusions de [9] pour les surfaces tactiles horizontales et verticales.

- **Trouver un rythme simplifié l'exercice** : certains participants ont suggéré d'ajouter de la musique afin de simplifier l'exercice. Quelques citations : “le mouvement finit par être pleinement acquis et on peut alors l'accélérer, surtout lors de l'utilisation des mains ordonnées qui est apparemment très rythmée et qui serait plus amusant si cela avait été fait avec de la musique”, “il manque la musique pour rythmer le mouvement. Ce serait plus amusant et plus engageant pour effectuer la tâche”.

3.5 Expérience 2 : Synchronisations des Mains Libres dans une Tâche de Pointage Simple

Notre première expérience a évalué chaque synchronisation de mains séparément. Ce faisant, nous sommes en mesure de comprendre les avantages et les inconvénients de chacune de ces synchronisations. Cependant, pour mieux comprendre l'évolution de la fatigue du bras lors d'une tâche de pointage en fonction des préférences de l'utilisateur, nous avons conçu une expérience de synchronisation des mains libres.

À la fin de l'expérience 1 sur la synchronisation des mains contrôlées, les dix participants sont revenus un jour de plus pour faire une tâche de pointage simple similaire à celle qu'ils avaient déjà effectués. Cependant, cette fois, la tâche de pointage durait pendant 20 minutes et nous n'y avons testé qu'un seul axe de direction. Nous avons sélectionné la direction UD pour une plus grande gamme d'effets biomécaniques [9]. Les participants ont ensuite été invités à effectuer la tâche aussi rapidement et précisément que possible tout en étant libres d'utiliser la ou les mains et la ou les synchronisations de mains qu'ils préféraient. Les participants n'étaient pas non plus obligés d'utiliser toutes les synchronisations possibles des mains s'ils n'en ressentaient pas le besoin et il leur a été indiqué qu'ils pouvaient aussi proposer leurs propres variations de synchronisations. Enfin, nous avons demandé aux participants d'évaluer la fatigue de leurs bras droit et gauche toutes les 15 secondes.

3.6 Résultats de l'Expérience 2 - Libre

Un participant (P1) a arrêté l'expérience après 10 minutes d'exercice car il se sentait très fatigué. Par conséquent, nous avons exclu ce participant des analyses. Ci-dessous, nous rapportons les résultats de nos neuf participants restants.

Nous avons constaté que la fatigue perçue pour le bras droit et gauche augmentait soit simultanément (P2, P4, P6, P7, P9 et P10) ou alternativement (P3, P5 et P8) selon le participant (voir Figure 3.7). Fait intéressant, pour tous les participants sauf

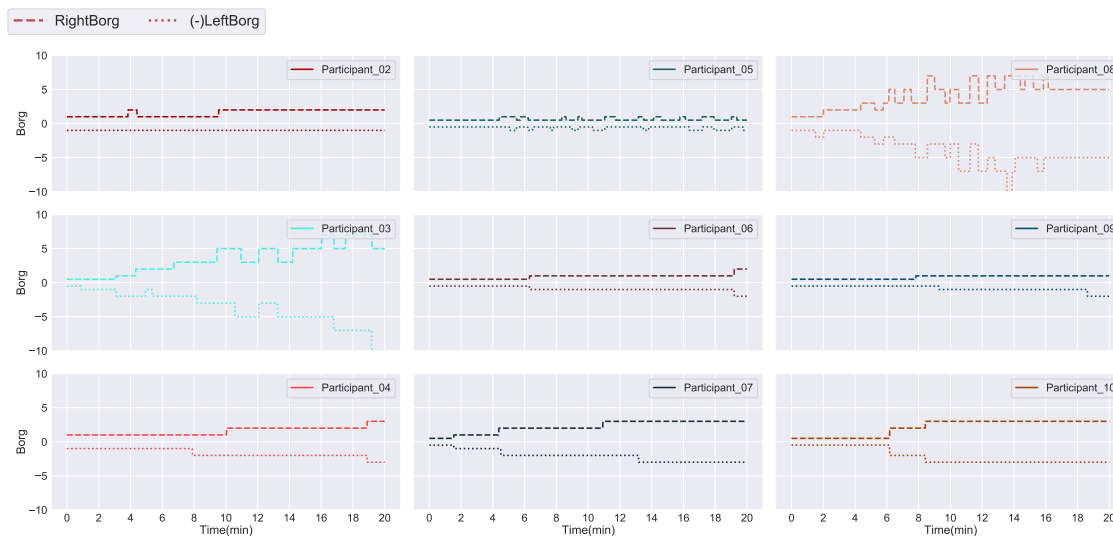


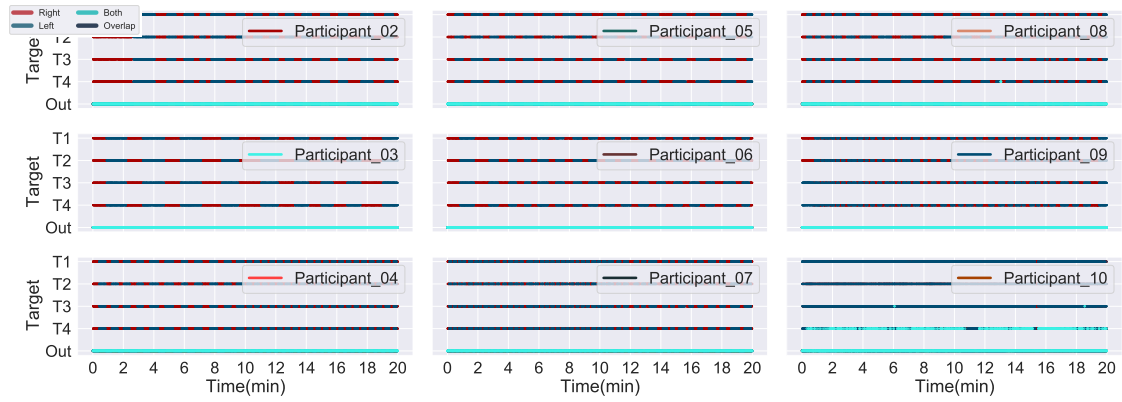
FIG. 3.7 – Valeurs pour la fatigue perçue du bras droit et gauche de chaque utilisateur. Par souci de clarté, les valeurs de fatigue du bras gauche sont affichées en valeurs négatives mais sont en réalité positives.

P3 et P8, la fatigue perçue n’a pas dépassé un niveau modéré (*i.e.*, 3 sur l’échelle de Borg C10), suggérant que les participants ont utilisé des stratégies efficaces pour contrôler leur fatigue. Il est intéressant d’observer que lors de l’expérience précédente les niveaux de fatigue moyens pour les bras dépassaient le niveau fort (*i.e.*, 5 sur l’échelle de Borg C10) en seulement deux minutes. Concernant l’utilisation des mains (Figure 3.8a), nous avons observé que tous les participants utilisaient une main à la fois et alternaient entre les conditions de synchronisation des mains 1HR et 1HL. Tous, à l’exception de P10, ont utilisé la même main (*i.e.*, soit la main droite, soit la main gauche) pendant une courte période (moins d’une minute), puis sont passés à l’autre main et ainsi de suite. Pour P10, lorsque nous avons regardé plus précisément comment il utilisait ses mains (voir Figure 3.8b), nous avons observé qu’il alternait entre les mains droite et gauche tous les un ou deux essais, ce qui peut être vu comme un chevauchement des couleurs droite et gauche sur la figure 3.8a.

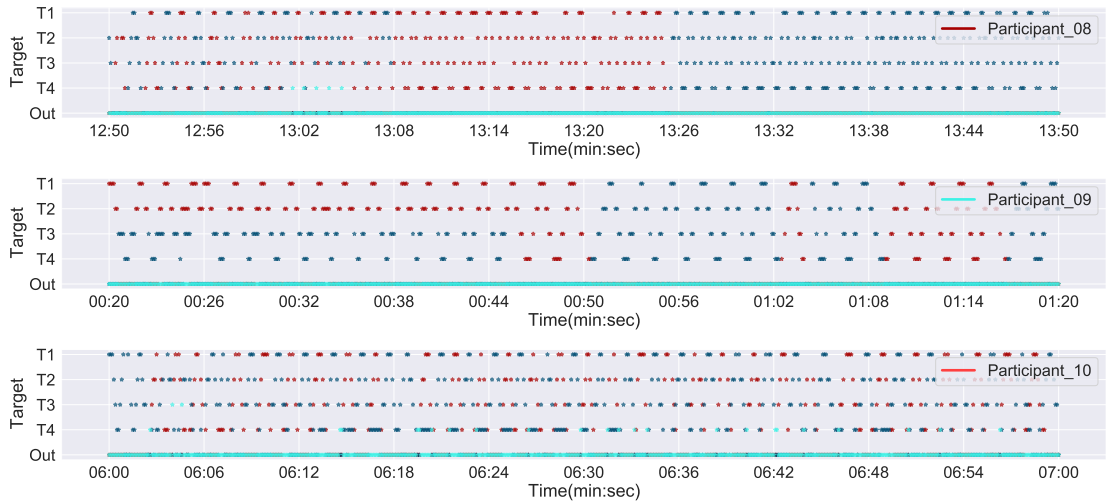
Nos participants ont déclaré qu’ils “changeaient de main chaque fois qu’ils sentaient que leur fatigue augmentait, pour permettre à la main actuelle de se reposer”. Quelques citations : “en changeant fréquemment mes mains, je permets à mes mains de se reposer et j’évite de me fatiguer”, “utiliser une main à la fois protège mes deux bras de la fatigue et empêche l’exercice de devenir trop difficile à faire”.

Fait intéressant, aucun de nos participants n’a utilisé la synchronisation *2HT* pendant toute l’expérience car ils ont estimé que la tâche ne nécessitait pas l’utilisation des deux mains. Cependant, sur la figure 3.8b on peut remarquer que les participants P8 et P10 avaient parfois les deux mains dans les cibles du bas (*ie*, T4 et

3.6. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 2 - LIBRE



(a) Utilisation des mains pendant l'intégralité de la durée de l'exercice.



(b) Zoom sur l'utilisation des mains des participants P8, P9 et P10 qui représentent les différentes stratégies : utilisation d'une main puis de l'autre après quelques essais pour P8 et P9, alternance de la main à chaque essai et parfois utilisation des deux mains sur les cibles du bas pour P8 et P10 et une courte utilisation d'une stratégie dérivée de 2HO pour P9 (utiliser la main gauche pour T3 et T4 et la main droite pour T1 et T2).

FIG. 3.8 – Utilisation des mains : Voici les tracés de l'emplacement de la main par rapport aux 4 cibles. Lorsqu'une main n'est pas dans une cible, elle est considérée comme Out (i.e. en dehors de toutes cibles). Les mains étant souvent en dehors des cibles (soit parce que non utilisée soit parce qu'entre deux cibles), nous observons donc une ligne bleu clair (Both) quasiment continue pour le Out.

T3) et que P9 a commencé l'exercice en utilisant une variante de la technique 2HO avec la main gauche sur T3 et T4 et la main droite sur T1 et T2. De plus, comme ils avaient la liberté de choisir les mains qu'ils utilisaient et leur synchronisation, les participants ont affirmé qu'ils “préféraient éviter de fatiguer leurs deux mains en

même temps et ont plutôt réparti la fatigue perçue entre les deux mains tout au long de l'exercice”.

3.7 Discussion pour les Expériences 1 & 2

Nos expériences nous permettent d’avoir une idée précise de l’effet de la synchronisation des mains sur la fatigue perçue par l’utilisateur lors de l’exécution d’une tâche de pointage simple (une ligne séquentielle). Dans cette section, nous résumons nos résultats et discutons des implications sur la façon de les appliquer.

3.7.1 Fatigue et Interfaces Gestuelles en VR

Dans l’expérience 1, où la synchronisation des mains était contrôlée, nous avons trouvé que les participants étaient modérément en accord lors de l’évaluation de la fatigue perçue des bras droit et gauche pour une tâche de pointage simple et sous diverses synchronisations des mains et diverses directions de mouvement, comme indiqué par les coefficients de concordance W de Kendall autour de 0,5. Dans le même temps, nous avons constaté que plus la période de temps est haute (*i.e.*, plus les participants effectuent la tâche longtemps), plus le consensus entre les notes des participants est élevé, ce qui suggère qu’ils ont tendance à converger vers les mêmes niveaux de fatigue perçue avec de la pratique pour un tel exercice. Nous aurions donc probablement pu avoir des résultats plus significatifs en faisant durer les exercices plus longtemps. Cependant, l’expérience étant déjà particulièrement longue, un biais d’ennui aurait pu apparaître.

Globalement, les conditions à une main (*1HR* et *1HL*) étaient plus fatigantes pour le bras correspondant que les conditions à deux mains (*2HO* et *2HT*) en particulier pour les dernières périodes de temps. Pour le bras gauche, ce résultat est valable pour les diagonales et l’axe verticale (LDF, LDN, LUF et UD pour *2HO* et LUF pour *2HT*). De plus, en termes de réduction de la fatigue, nos participants ont exprimé des préférences pour les directions sur le plan horizontal (FN et LR) par rapport aux directions verticale et diagonales. Par conséquent, les diagonales et la verticale doivent être utilisées avec précaution et uniquement sur de courtes durées pour limiter la fatigue musculaire [167, 169]. Ce résultat est comparable à ceux de Al-Megren et al. [9] où ils ont constaté que les grands écrans tactiles verticaux étaient plus fatigants à utiliser que ceux horizontaux en raison de l’élévation requise des bras lors de l’interaction avec l’affichage vertical.

Il est important de noter que même si les conditions à deux mains étaient perçues comme moins fatigantes que les conditions à une main dans notre expérience

contrôlée, nos participants n'ont utilisé que les conditions à une main dans notre tâche libre tout en alternant les mains très fréquemment, *i.e.* utilisant chaque main pendant une courte période de temps (inférieure à une minute) puis passant à l'autre main lorsqu'ils sentent que leur fatigue va augmenter, ce qui leur permet de contrôler leur fatigue sans dépasser un niveau modéré pour chaque bras. Cette stratégie a été motivée par le fait que la tâche de pointage simple ne nécessite pas l'utilisation des deux mains pour la réalisation d'un essai et plus encore, l'utilisation des deux mains rend l'exercice plus compliqué à réaliser et fait baisser les performances des participants. Ceci justifie pourquoi nos participants ont préféré utiliser une main à la fois lors de la réalisation des essais. Cela permettait donc d'éviter de fatiguer leurs deux mains en même temps. Ceci suggère que l'interaction à une main devrait être préférée aux interactions à deux mains en particulier lorsque la tâche ne nécessite pas l'utilisation des deux mains. Les interfaces gestuelles pourraient également bénéficier de la possibilité pour les utilisateurs de basculer librement entre les mains à tout moment, afin qu'ils puissent gérer individuellement la fatigue perçue des bras. De plus, comme nos résultats indiquent que la main non dominante (ici la main gauche) n'était pas perçue comme étant plus fatigante à bouger et était aussi performante que la main dominante, la main non dominante devrait, par conséquent, être autant exploitée que la main dominante. Cependant, la main dominante doit être privilégiée dès que la main utilisée doit être prédéfinie car la main dominante a été préférée par nos participants.

En regardant la corrélation entre les différents descripteurs de mouvement et la fatigue perçue pour le bras droit et le bras gauche, nous avons constaté que la distance parcourue cumulée droite et gauche et le temps cumulé étaient les plus corrélés avec respectivement la perception de la fatigue du bras droit et gauche. De plus, nous avons observé un ensemble de changements de postures corporelles et de stratégies utilisées par nos participants pour réduire cette fatigue. Par conséquent, la distance parcourue, le temps et le changement de posture corporelle pourraient être utilisés pour détecter une augmentation de la fatigue perçue. Il pourrait être intéressant lors de la conception des gestes d'envisager de les adapter à la fatigue en faisant varier les synchronisations des mains et des directions de mouvement vers des moins fatigantes à articuler. De plus, les concepteurs doivent permettre aux utilisateurs de se reposer selon leurs besoins ou de ralentir leur vitesse de déplacement et donc de parcourir moins de distance avec leurs bras, en particulier si la synchronisation des mains et la direction du mouvement sont des paramètres prédéfinis. Enfin et comme suggéré par nos participants, l'ajout d'une musique ou d'un rythme imposé lors de l'exécution de la tâche pourrait être une solution pour simplifier la tâche et aider à réduire la fatigue perçue et c'est d'ailleurs ce point que nous traiterons dans notre prochain chapitre correspondant à la publication suivante [138].

3.7.2 Compromis Performance/Fatigue

Les conditions à une main sont globalement plus performantes que celles à deux mains. En particulier, ces différences de performances se creusent pour certaines directions que sont les diagonales LUF et LDN qui correspondent aux directions demandant le plus d'extension pour respectivement le bras droit et le bras gauche.

Nos résultats indiquent que les conditions à une main étaient plus rapides que les conditions à deux mains pour certaines directions diagonales, surtout pour la direction LUF. Les conditions à une main étaient également plus rapides que pour la synchronisation de mains ordonnées lors du déplacement dans la direction verticale (UD).

De plus, la main droite permet de faire plus d'essais que les mouvements à deux mains ordonnées, quelque soient les directions. Cependant, avec la main droite nous ne produisons plus d'essais par rapport à lorsqu'on utilise les mouvements où les deux mains sont ensemble dans les cibles que pour les directions suivant les trois axes principaux et la diagonale LDN. Fait intéressant, les deux conditions à une main ont produit plus d'essais lors du déplacement dans le plan frontal (LR et UD) que lors du déplacement dans les directions diagonales (LUF pour 1HR et LDN pour 1HL) où une extrémité de la séquence de cibles était sur le côté opposé à la position de repos de la main utilisée qui implique la plus grande extension par le bras.

En ce qui concerne la distance d'essai, nous avons d'abord constaté que pour les deux conditions à une main, la main non utilisée fait de petits mouvements. Aussi, il est important de noter que la synchronisation des mains ordonnées a produit des distances droite et gauche plus longues que les autres synchronisations des mains pour toutes les directions, à l'exception du LUN pour la distance gauche (diagonale où le coude gauche peut rester collé au corps). De plus, lors de l'alternance des mains, nos résultats indiquent que les diagonales éloignées d'une main spécifique (*i.e.*, LUF pour la main droite et LDN pour la main gauche) impliquent une distance parcourue plus longue par cette main que les trois directions principales. Lors de l'utilisation des mouvements des deux mains ensemble, les directions diagonales impliquent des distances parcourues droite et gauche plus longues que les directions restantes.

Par conséquent, les directions verticales et diagonales, en plus d'augmenter la fatigue perçue, semblent détériorer les performances notamment lors de l'utilisation de conditions à deux mains.

Ainsi, dans la mesure du possible, les concepteurs doivent privilégier les directions horizontales pour limiter à la fois la fatigue musculaire [167, 169, 9] et la détérioration des performances. Cependant, si le concepteur doit utiliser des directions diagonales, il devrait favoriser les diagonales qui ne provoquent pas une forte extension des bras. Nos participants ont préféré les directions LDF et LUN à celles de LUF et LDN en termes de fatigue perçue car avec ces directions, ils ont gardé le coude près de leur corps ce qui demande moins d'effort que lorsqu'ils doivent étendre leur bras pour

effectuer la tâche.

De plus, nos participants ont estimé que les conditions à deux mains étaient plus difficiles à réaliser, ce qui est corrélé aux conclusions de [135]. Par conséquent, ils ont ralenti la vitesse de leurs mouvements pour rester précis, ce qui a diminué la distance parcourue et par conséquent leur fatigue perçue. Cependant, nos résultats semblent contredire les résultats de la littérature [78, 95, 39], qui suggéraient une plus grande efficacité des interactions à deux mains. En fait, les conditions à deux mains semblent ici être moins efficaces que les conditions à une main, *i.e.*, des temps d'essai plus longs, un nombre d'essais inférieur, une distance d'essai plus longue. Nous pensons que cela est dû à notre tâche qui favorise les interactions à une main par la sélection d'une séquence de cibles alignées tout en sélectionnant une cible à la fois. En revanche, nous observons que dans des conditions à une main, les participants ont effectué plus d'essais et étaient plus efficaces. Nous suggérons que cette augmentation de la vitesse pourrait expliquer le niveau de fatigue plus élevé pour les conditions à une main. Pour palier à cette limitation, nous avons proposé une nouvelle tâche de pointage que nous présenterons dans les sections qui suivent.

3.8 Expérience 3 : Synchronisation de Mains Contrôlée pour une Tâche de Pointage Composite

Nous avons mené une troisième expérience pour évaluer l'effet de la synchronisation des mains sur la fatigue des bras perçue par l'utilisateur et ses performances lors d'une tâche de pointage composite dans un environnement de réalité virtuelle. La tâche composite est constituée de deux lignes de cibles à pointer, similaires à celles de la tâche simple des expériences 1 et 2. Cependant la synchronisation de mains que nous proposons seront différente en raison de la tâche qui change. Elle devra être exécutée soit séquentiellement en utilisant une main sur toute la tâche, soit en combinant les deux mains de manière synchrone ou asynchrone (une après la autre) de telle sorte que chaque main soit concernée par une ligne de cibles. Cette tâche pourrait augmenter la charge cognitive, en particulier lors de l'utilisation des conditions à deux mains et elle pourrait nécessiter plus d'effort pour être accomplie en particulier pour les conditions à une main. De même que pour l'expérience 1, nous sommes plus intéressé par la fatigue des bras que par la performance. Par conséquent, la tâche était effectuée de manière répétée pendant deux minutes pour les différentes conditions évaluées dans notre expérience.

L'expérience utilisait le même équipement que dans l'expérience 1.

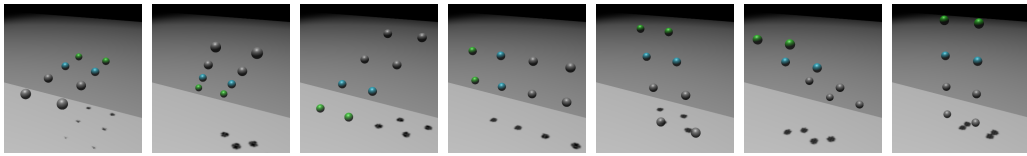
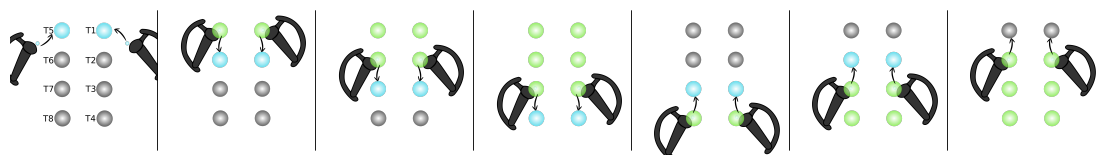
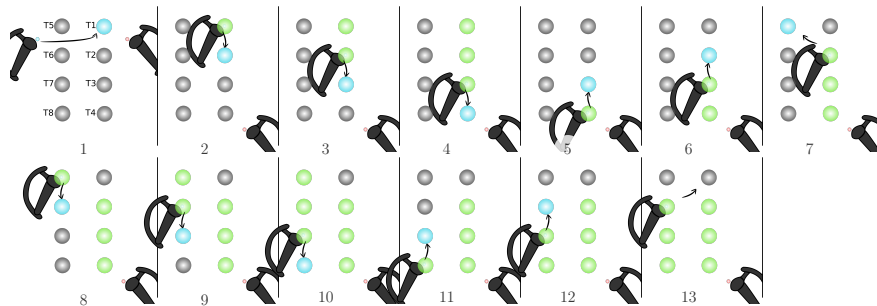


FIG. 3.9 – Les 7 directions que les participants peuvent voir dans l’environnement virtuel pour un petit espacement. De gauche à droite : FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN, UD.



(a) Chemin à suivre pour la synchronisation 2HS



(b) Chemin à suivre lors de l’utilisation de 1HR, 1HL, 2HA. Pour 1HR, le participant devait utiliser uniquement la main droite. Pour le 2HA, le participant devait utiliser la main droite pour la ligne droite (T1-4) puis la main gauche pour la ligne gauche (T5-8).

FIG. 3.10 – Les deux types de séquences pour la tâche de sélection de cibles avec les différentes conditions de main.

3.8.1 Participants

Nous avons dix participants différents de ceux ayant pris part aux expériences 1 et 2 (uniquement des hommes) volontaires pour participer à notre expérience, âgés de 22 à 35 ans (moyenne=25,9, s.d=4,5). Tous les participants étaient droitiers. Trois participants utilisaient fréquemment des gestes en mid-air, trois avaient déjà utilisé des gestes en mid-air et quatre n’utilisaient jamais ou rarement de système en mid-air.

3.8.2 Design

L'expérience a utilisé une conception intra-sujets $4 \times 2 \times 7 \times 8$ pour les facteurs : *espacement*, *synchronisations des mains*, *directions* et *périodes de temps*.

Les *directions* et *périodes de temps* sont définies de la même manière que dans l'expérience 1. Pour les directions, nous pouvons voir sur la Figure 3.9 que les deux lignes de cibles sont décalées du centre d'un espacement correspondant à la variable suivante. Ce décalage s'effectue sur l'axe transversal pour toutes les directions sauf gauche-droite (LR) car sinon les deux lignes étaient confondues. Nous avons donc choisi un décalage vertical pour cette direction afin que le participant puisse correctement visualiser les deux lignes.

L'*espacement* est la distance entre les deux lignes de cibles et couvre deux valeurs : *large* : 50 cm, *petit* : 10 cm. Ces deux conditions d'espacement ont été définies en fonction des dimensions moyennes du corps humain masculin [112, 5], la grande correspondant à l'espacement moyen entre les épaules.

Pour la *synchronisation des mains* nous avons testé quatre conditions différentes couvrant les mains utilisées et leur synchronisation pour accomplir la tâche de pointage séquentiel : *1HR* : mouvements séquentiels avec la main droite, *1HL* : mouvements séquentiels avec la main gauche, *2HS* : mouvements synchrones à deux mains et *2HA* : mouvements asynchrones à deux mains. Pour les conditions à deux mains, chaque main pointe sur les cibles correspondant à la latéralité de la main utilisée (à l'exception de LR où la droite valide les cibles du haut et la main gauche les cibles du bas). De plus, comme nous sommes préoccupés par la durée globale de l'expérience, nous décidons de ne pas évaluer les deux conditions *2HT* et *2HO*, utilisées dans la première expérience, pour réduire la durée de l'expérience. Aussi, les conditions à deux mains (*2HS* et *2HA*) utilisées dans cette expérience sont importantes à évaluer car elles sont utilisées dans de nombreux contextes comme la rééducation, le sport ou les jeux.

3.8.3 Procédure & Tâche

Dans cette expérience, les participants étaient invités à pointer, sur deux séquences linéaires, des cibles sphériques de 5 cm de diamètre (séquence 1 : t1, t2, t3, t4, t3, t2 et séquence 2 : t5, t6, t7, t8, t7, t6) aussi rapidement et précisément que possible (voir Figure 3.10).

Dans les conditions à une main, les participants devaient pointer sur les cibles séquentiellement en commençant par la séquence 1 puis la séquence 2 (*i.e.*, t1 puis t2, t3, t4, t3, t2, t5, t6, t7, t8, t7 et enfin t6). Comme pour l'expérience 1, dans

la condition *1HR*, les participants devaient effectuer la tâche en utilisant leur main droite tandis que dans la condition *1HL*, les participants avaient à utiliser leur main gauche. Dans les conditions à deux mains, comme ici nous avons deux séquences de cibles, nous avons imposé l'utilisation de chaque main pour pointer la séquence de cibles la plus proche d'elle, *i.e.*, avec la main droite les participants devaient sélectionner la première séquence de cibles située à leur droite (dans l'ordre suivant : t1 puis t2, t3, t4, t3 et enfin t2), et avec la main gauche la deuxième séquence de cibles (dans l'ordre suivant : t5 puis t6, t7, t8, t7 et enfin t6). Par conséquent, pour la condition *2HS*, les participants étaient invités à utiliser leurs deux mains simultanément, chaque main sélectionnant la séquence de cibles correspondante. Pour la condition *2HA*, les participants devaient utiliser leur bras droit pour sélectionner la première séquence de cibles, puis utiliser leur main gauche pour sélectionner la deuxième séquence de cibles. Le nombre de mains et leur synchronisation étaient des contraintes fixes qui devaient être respectées pendant tout l'essai.

Pour *1HR*, *1HL* et *2HA*, chaque essai commençait après que la cible t1 était sélectionnée avec succès et se terminait avec la sélection de la cible t6. Dans le *2HS*, chaque essai démarrait après que les cibles t1 et t5 étaient sélectionnées avec succès et se finissait par la sélection des cibles t2 et t6. Au début d'un essai, la ou les cibles de départ étaient actives et bleues tandis que les cibles restantes étaient inactives et grises. Lorsque la bonne main était à l'intérieur de la cible à sélectionner, la cible était validée et devenait verte alors que la suivante passait au bleu. Ici contrairement à notre première expérience, nous n'avions à aucun moment besoin d'avoir les deux mains dans une cible. Si la mauvaise main entraînait dans une cible bleu, une erreur était comptée, la cible clignotait en rouge et l'essai était réinitialisé. De plus, après avoir sélectionné et validé les quatre premières cibles (t1-t4) (resp. t5-t8), *ie*, les participants atteignaient la fin de la ligne, t1, t2 (resp. t5, t6) viraient au gris tandis que t3 (resp. t7) devenait bleu et actif. Enfin, pour la condition *2HS*, on ne comptait pas d'erreur si les deux cibles à valider n'étaient pas pointées exactement au même instant, la seule contrainte était que le prochain essai ne pouvait démarrer que lorsque les deux dernières cibles (*i.e.* t2, t5) étaient sélectionnées.

Un jour avant de commencer l'expérience principale, les participants étaient invités à effectuer la même tâche d'effort que pour la première expérience.

Dans la phase d'expérimentation, les quatre conditions de synchronisations des mains étaient présentées dans un ordre aléatoire, pour éviter les effets d'ordre aux participants. De plus, comme nous étions concentrés sur la perception de la fatigue du bras par l'utilisateur, chaque condition de synchronisation des mains était évaluée un jour différent. À l'intérieur de chaque condition de synchronisation, les deux conditions d'espacement étaient présentées dans un ordre aléatoire aux participants avec une pause d'au moins 10 minutes après chaque condition d'espacement. À l'intérieur de chaque espacement, les participants effectuaient 14 minutes de la tâche

3.9. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 3 - CONTRÔLÉE

de pointage. Toutes les 2 minutes, les participants évaluaient une nouvelle direction, avec une pause entre chaque direction pour éviter l'accumulation de fatigue. Les participants pouvaient commencer la direction suivante lorsqu'ils se sentaient complètement rétablis.

Notre application présentait au hasard les 7 directions à nos participants – un total de 448 (=4 mains synchronisation × 2 espacements × 7 directions × 8 périodes de temps de 15 s) périodes de temps de 15 s. Après chaque période de 15 s, un bip était émis pour rappeler aux participants d'évaluer leur perception de la fatigue du bras droit et du bras gauche en fonction de l'échelle de Borg CR10 [76, 28] comme dans l'expérience 1. Si les participants n'avaient pas terminé l'essai en cours à la fin des 15s, cet essai était compté dans les 15 s suivantes. Si les 2 minutes se terminaient alors que l'essai en cours ne l'était pas, il n'était pas comptabilisé. Le participant devait prendre une pause avant d'entamer les deux prochaines minutes d'expérience. À la fin de chaque direction et de chaque condition de la main, les participants pouvaient expliquer leur évaluation de la fatigue : pourquoi telle condition était plus ou moins fatigante qu'une autre, qu'est-ce qui dans la tâche les avait particulièrement fatigué, avaient-ils développé des stratégies particulière pendant l'exercice pour ne pas atteindre un trop haut niveau de fatigue. En moyenne, l'expérience durait 240 minutes, réparties en quatre séances sur quatre jours consécutifs.

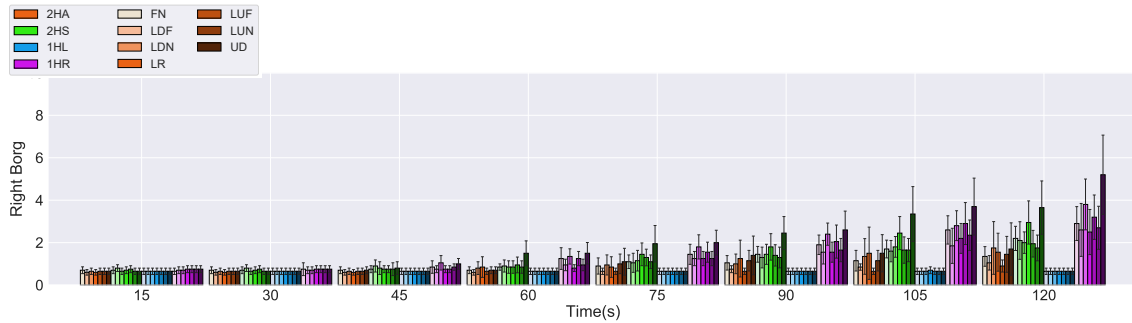
3.9 Résultats de l'Expérience 3 - Contrôlée

3.9.1 Consensus entre Utilisateurs sur la Fatigue Perçue

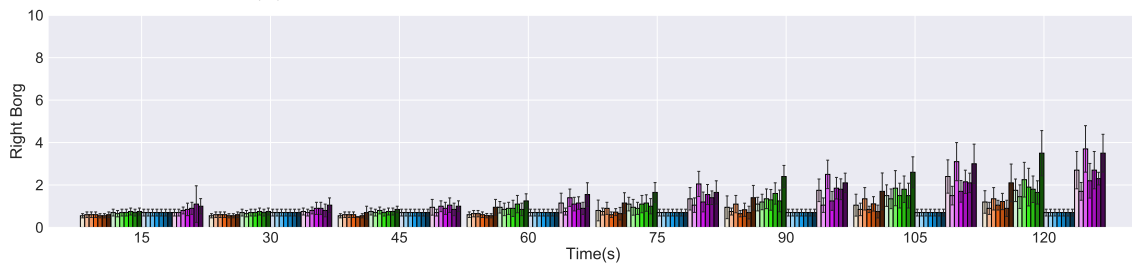
Nous rapportons ici le niveau d'accord entre les participants en termes de fatigue du bras droit et de la fatigue du bras gauche lors d'une tâche de pointage composite (de deux séquences de cibles) dans un environnement virtuel. Nous avons analysé 8 960 (2 espacements × 4480 = 2 (fatigue du bras droit et fatigue du bras gauche) × 4 synchronisations × 7 directions × 8 périodes de temps) évaluations individuelles de fatigue absolue recueillies auprès de 10 participants.

Fatigue du bras droit :

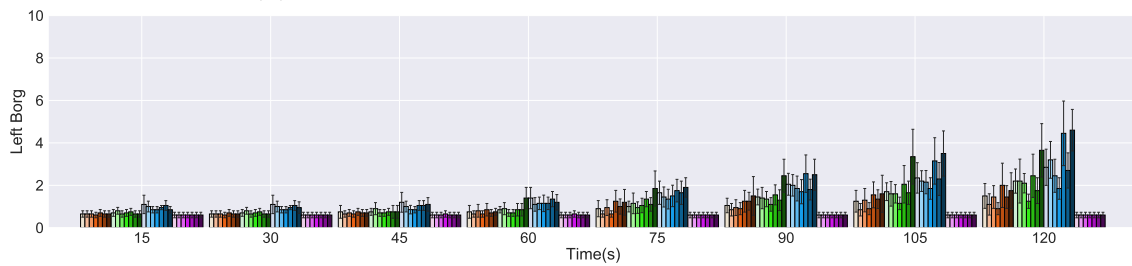
La figure 3.11 illustre les évaluations par les participants de la fatigue perçue du bras droit lors d'une tâche de pointage de deux séquences de cibles avec *1HR*, *1HL*, *2HS* et *2HA*. Nous avons trouvé un degré de consensus plus faible entre les évaluations des participants sur la fatigue du bras droit, par rapport à l'expérience 1. Cependant, les coefficients de Kendall sont restés au-dessus de .4, ce qui est confirmé



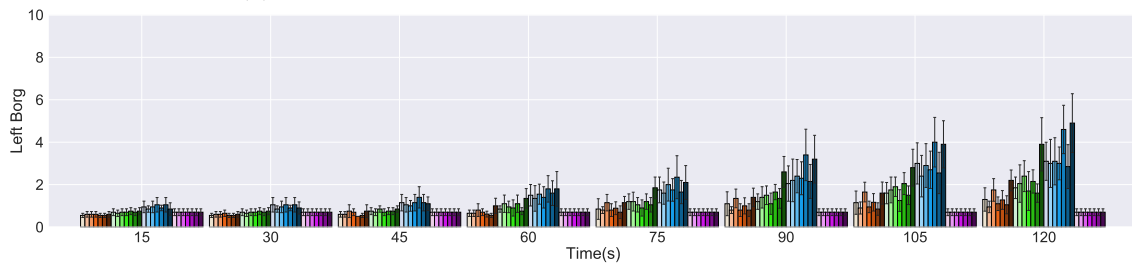
(a) *Fatigue du bras droit pour un espacement large.*



(b) *Fatigue du bras droit pour un espacement petit.*



(c) *Fatigue du bras gauche pour un espacement large.*



(d) *Fatigue du bras gauche pour un espacement petit.*

FIG. 3.11 – Valeurs moyennes de la fatigue perçue par l'utilisateur pour le bras droit et l'espacement large (a), le bras droit et le petit espacement (b), le bras gauche et le large espacement (c) et le bras gauche et le petit espacement (d) mesurées comme fonction d'évaluation de la synchronisation des mains (1HR, 1HL, 2HA et 2HS) et des directions de mouvement (FN, LDF, LDN, LR, LUF, LUN et UD).

3.9. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 3 - CONTRÔLÉE

par des tailles d'effet Cohen modérées ($W = .446$, $\chi^2(442) = 1972$, $p < .0001$).

Lors du calcul de l'accord pour chaque condition de synchronisation des mains, les coefficients W de Kendall sont restés au-dessus de .4 ($.403 < W < .561$ pour les conditions *1HR*, *2HA* et *2HS*). Le niveau d'accord entre les participants est également resté modéré lorsque nous avons effectué l'analyse pour chaque condition de direction de mouvement ($.383 < W < .544$) et chaque condition d'espacement (large: $W = .469$ et petit: $W = .466$). Comme dans l'expérience 1, nous avons constaté que plus la période de temps est haute, plus le degré de consensus entre les participants est élevé, les coefficients W de Kendall variant de .198 à .518.

Les tests ANOVA à mesures répétées ont révélé des effets principaux significatifs de *synchronisation* ($F_{3,520} = 367.03$, $p < .0001$), *direction* ($F_{6,98} = 34.87$, $p < .0001$) et *période* ($F_{7,676} = 204.38$, $p < .0001$) sur la fatigue du bras droit avec les interactions: *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,72} = 8.46$, $p < .0001$), *synchronisation* \times *période* ($F_{21,375} = 37,74$, $p < .0001$) et *direction* \times *période* ($F_{42,76} = 3,83$, $p < .0001$).

Des tests post-hoc ont révélé que *1HR* était jugé significativement plus fatigant que *1HL* et *2HA* dans toutes les directions ($p < .05$). Aussi, *1HR* a été jugé significativement plus fatigant que *2HS* pour les directions FN, LDN et LUF ($p < .05$). De plus, lors de l'utilisation de *1HR*, la direction UD (respectivement, LDN) a été jugée significativement plus fatigante que FN, LDF, LR, LUF, LUN (respectivement, FN, LDF, LR, LUN) et LUF a été noté significativement plus fatigant que LDF ($p < .05$). Par ailleurs, *1HL* a été jugé significativement moins fatigant que *2HS* et *2HA* pour respectivement toutes les directions et la direction UD ($p < .05$). De plus, nous avons constaté que *2HS* était jugé significativement plus fatigant que *2HA* pour les directions LDF, LR, LUF, UD ($p < .05$). Nous avons également constaté que, lors de l'utilisation de *2HS* (respectivement *2HA*), UD était notée significativement plus fatigante que les directions restantes (respectivement les directions LDF et LUF) ($p < .05$).

Des tests post-hoc ont également révélé que *1HR* était jugé significativement plus fatigant que *1HL*, *2HA* et *2HS* respectivement pour les périodes 60 s-120 s, 60 s-120 s et 90 s-120 s de l'exercice ($p < .05$). Nous avons également constaté que lors de l'utilisation de *1HR*, les périodes de 60 s, 75 s, 90 s, 105 s et 120 s étaient significativement plus fatigantes que respectivement les deux premières périodes (15 s et 30 s), les quatre premières périodes de temps (15 s-60 s), les cinq premières périodes de temps (15 s-75 s), les six premières périodes de temps (15 s- 90 s) et toutes les périodes de temps restantes (15 s-105 s) ($p < .05$). *1HL* a été jugé significativement moins fatigant que *2HS* et *2HA* pour respectivement les quatre dernières périodes (75 s-120 s) et les deux dernières périodes (105 s et 120 s) ($p < .05$). De plus, nous avons constaté que *2HS* était jugé significativement plus fatigant

que *2HA* pour les quatre dernières périodes (75 s-120 s) ($p < .05$). De plus, nous avons constaté que lors de l'utilisation de *2HA*, les périodes de 90 s, 105 s et 120 s étaient notées significativement plus fatigantes que respectivement les trois premières périodes (15 s-45 s), les quatre premières périodes (15 s-60 s) et les six premières périodes (15 s-90 s) ($p < .05$). Lors de l'utilisation de *2HS*, les périodes de 75 s, 90 s, 105 s et 120 s ont été jugées significativement plus fatigantes que respectivement les trois premières périodes de temps (15 s-45 s), les quatre premières périodes (15 s-60 s), les six premières périodes (15 s-90 s) et les périodes restantes (15 s-105 s) ($p < .05$).

Fatigue du bras gauche :

La figure 3.11 illustre les évaluations par les participants de la fatigue perçue du bras gauche lors de l'exécution de la tâche de pointage composite avec *1HR*, *1HL*, *2HA* et *2HS*. De même que pour la fatigue du bras droit, nous avons trouvé un degré modéré de consensus entre les évaluations des participants de la fatigue du bras gauche ($W = .535$, $\chi^2(442) = 2365$, $p < .0001$). Lors du calcul de l'accord pour chaque synchronisation des mains, les coefficients W de Kendall sont restés au-dessus de .4 ($.404 < W < .548$ pour les conditions *1HL*, *2HA* et *2HS*). Le niveau d'accord entre les participants est également resté modéré lorsque nous avons effectué l'analyse pour chaque condition de direction de mouvement ($.487 < W < .657$) et chaque condition d'espacement (large: $W = .547$ et petit: $W = .550$). Comme dans l'expérience 1, nous avons également constaté que plus la période de temps est haute, plus le degré de consensus entre les participants est élevé, les coefficients W de Kendall variant de .363 à .657.

L'ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif de *synchronisation* ($F_{3,852} = 561.66$, $p < .0001$), *direction* ($F_{6,103} = 33.94$, $p < .0001$) et *période* ($F_{7,775} = 218.83$, $p < .0001$) sur la *fatigue de bras gauche* avec les interactions: *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,69} = 7.54$, $p < .0001$), *synchronisation* \times *période* ($F_{21,435} = 40.96$, $p < .0001$), *direction* \times *période* ($F_{42,107} = 5.08$, $p < .0001$) et *synchronisation* \times *direction* \times *période* ($F_{126,81} = 1.264$, $p = .0262$).

Des tests post-hoc ont révélé que *1HL* est jugé significativement plus fatigant que *2HA* lors du déplacement des mains dans les directions FN, LDN et LUN pour les deux dernières périodes de temps (105 s-120 s) et dans les directions LDF, LR, LUF et UD pour les trois dernières périodes de temps (90 s-120 s) ($p < .05$). De plus, *1HL* est jugé significativement plus fatigant que *2HS* lors du déplacement des mains dans les directions LR, LUF et LUN pendant respectivement la période de temps 105 s, les trois dernières périodes de temps (90 s-120 s) et la dernière période de temps 120 s ($p < .05$). *1HL* est également notée significativement plus fatigant que *1HR* dans les directions FN, LUF et UD pour les quatre dernières périodes

3.9. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 3 - CONTRÔLÉE

(75 s-120 s) et en LDF, LDN, LR et LUN pour les trois dernières périodes de temps (90 s-120 s) ($p < .05$).

Nous avons également constaté que lors de l'utilisation de *1HL*, selon la direction, les périodes de la deuxième à la quatrième en partant de la fin sont perçues significativement plus fatigantes que les deuxième au quatrième périodes de temps depuis le début ($p < .05$).

De plus, lors de l'utilisation de *1HL*, pour les deux dernières périodes de temps (105 s-120 s), le déplacement des mains dans les directions LUF et UD a été jugé significativement plus fatigant que lors du déplacement de la main en LDF, LDN, LR et LUN. Il a également été jugé plus fatigant que dans le sens FN mais seulement pour la dernière période (120 s) ($p < .05$).

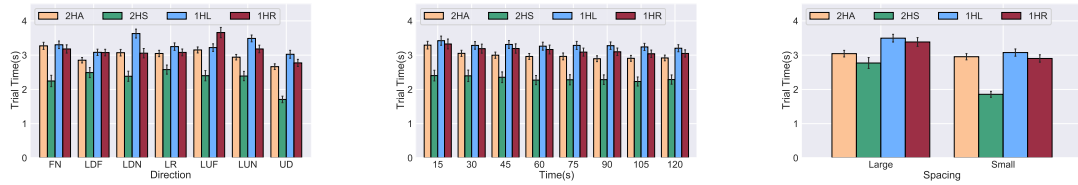
Dans les directions LDF et UD, l'utilisation de *2HA* a été jugée significativement moins fatigante que l'utilisation de *2HS* pour respectivement, la dernière période de temps (120 s) et les trois dernières périodes de temps (90 s-120 s) ($p < .05$). De plus, dans la direction UD, pour la dernière période de temps (120 s), *2HA* a été jugé significativement plus fatigant que *1HR* ($p < .05$). Lorsque vous utilisez *2HA* et déplacez la main dans la direction UD, la dernière période de temps (120 s) est notée significativement plus fatigante que les quatre premières périodes (15 s-60 s) ($p < .05$).

Dans les directions FN et LDF, *2HS* a été jugé significativement plus fatigant que *1HR* pour la dernière période de temps (120 s) et dans les directions LDN et LUF, pour les deux dernières périodes de temps (105 s-120 s) ($p < .05$). Dans la direction UD, *2HS* a été jugé significativement plus fatigant que *1HR* pour les quatre dernières périodes (75 s-120 s) ($p < .05$). Lors de l'utilisation de *2HS*, la dernière période (120 s) a été jugée significativement plus fatigante que les quatre (15 s-60 s), les cinq (15 s-75 s) et les six (15 s-90 s) premières périodes de temps pour respectivement les directions LUF, LDF et FN, les directions LUN et LDN et la direction UD ($p < .05$). De plus, lors de l'utilisation de *2HS*, pour les trois dernières périodes de temps (90 s et 120 s), le déplacement des mains dans la direction UD a été jugé significativement plus fatigant que lors du déplacement de la main en FN, LDF, LDN, LR et LUN et que dans le sens LUF uniquement pour la dernière période de temps (120 s) ($p < .05$).

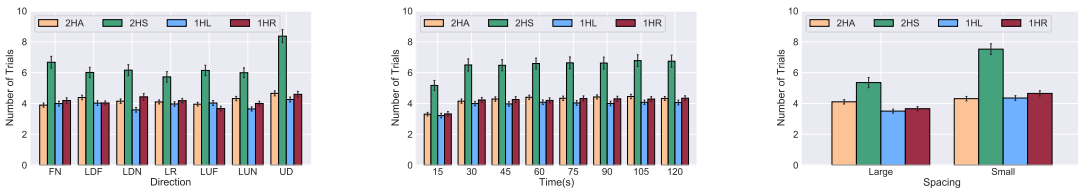
3.9.2 Performances des Utilisateurs

Nous considérons les mêmes variables dépendantes que dans l'expérience 1 (voir Section 3.4.2).

CHAPITRE 3. FATIGUE ET INTERACTIONS À UNE OU DEUX MAINS



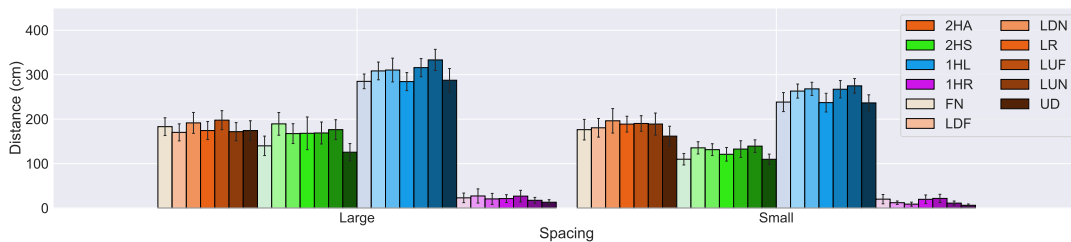
(a) Temps de l'essai en moyenne par direction (b) Temps de l'essai en moyenne par période de temps (c) Temps de l'essai en moyenne par espacement



(d) Nombre d'essai en moyenne par direction (e) Nombre d'essai en moyenne par période de temps (f) Nombre d'essai en moyenne par espacement



(g) Distance parcourue par la main droite pour un essai en moyenne par direction (h) Distance parcourue par la main droite pour un essai en moyenne par espacement



(i) Distance parcourue par la main gauche pour un essai en moyenne par direction et espacement

FIG. 3.12 – Expérience 3 – Résultats pour chaque mesures dépendantes.

Temps d'essai :

Il y avait un effet principal significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 46.125, p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 17.30, p < .0001$), *espacement* ($F_{1,9} = 61.996, p < .0001$) et *période* ($F_{7,63} = 6.915, p < .0001$) à l'essai avec les interactions : *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 7.50, p < .0001$), *synchronisation* \times *espacement* ($F_{3,27} = 8.33, p = .0004$) et *synchronisation* \times *période* ($F_{21,189} = 1.84, p = .0168$).

Des tests post-hoc ont révélé que pour toutes les directions, *2HS* est significativement plus rapide que les conditions à une main. Ils ont également révélé que pour toutes les directions sauf LDF et LR, *2HS* est significativement plus rapide que *2HA*. Aussi, *2HA* est significativement plus rapide que *1HR* (respectivement, *1HL*) lors du déplacement des mains dans le sens LUF (respectivement LDN et LUN) ($p < .05$). De plus, avec *2HS*, la direction UD est nettement plus rapide que toutes les autres directions. Pour *2HA*, la direction LDF (respectivement UD) est significativement plus rapide que la direction FN (respectivement FN, LDN et LUF). Pour *1HR*, la direction LUF est significativement plus lente que toutes les directions restantes. Pour *1HL*, LDF (respectivement LUF) est significativement plus rapide que les directions LDN et LUN (respectivement LDN).

Lorsque des conditions à une main et *2HS* sont utilisées, l'espacement large demande beaucoup plus de temps pour réaliser un essai que le petit espacement ($p < .05$). De plus, pour le large espacement, *1HL* (respectivement, *1HR*) est significativement plus lent que les conditions à deux mains (respectivement, *2HS*) ($p < .05$). Pour le petit espacement, *2HS* est également significativement plus rapide que les trois synchronisations de mains restantes ($p < .05$).

Pour toutes les périodes de temps, nous avons trouvé que *2HS* est significativement plus rapide que les synchronisations des mains restantes ($p < .05$). Nous avons également constaté que lors de l'utilisation de *2HA* (respectivement *1HR*), la première période de temps est significativement plus lente que les périodes de temps restantes (respectivement, les quatre dernières périodes de temps) ($p < .05$).

Nombre d'essais :

Il y avait un effet principal significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 37.966, p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 33.57, p < .0001$), *espacement* ($F_{1,9} = 129.175, p < .0001$) et *période* ($F_{7,63} = 115.200, p < .0001$) sur le nombre d'essais avec les interactions : *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 11.818, p < .0001$), *synchronisation* \times *espacement* ($F_{3,27} = 22.24, p < .0001$), *synchronisation* \times *période* ($F_{21,189} = 3.184, p < .0001$).

Des tests post-hoc ont révélé que, pour toutes les directions, *2HS* a produit significativement plus d'essais que les autres synchronisations des mains. Avec *2HS*, la direction UD (respectivement FN) a produit significativement plus d'essais que toutes les directions restantes (respectivement les directions LDF et LR) ($p < .05$). Avec *1HR*, LUF a produit significativement moins d'essais que les deux directions LDF et UD. Alors qu'avec *1HL*, la direction UD a produit significativement plus d'essais que la direction LDN ($p < .05$).

Lors de l'utilisation de *1HR*, *1HL* et *2HS*, un petit espacement a produit significativement plus d'essais qu'un large espacement ($p < .05$). De plus, pour tous les espacements, *2HS* a produit significativement plus d'essais que les conditions *1HR*, *1HL* et *2HA* ($p < .05$).

Pour toutes les périodes de temps, nous avons constaté que *2HS* produisait significativement plus d'essais que le reste de la synchronisation des mains ($p < .05$). De plus, nous avons constaté que la première période de temps produisait significativement moins d'essais que les périodes de temps restantes pour toutes les conditions de synchronisation ($p < .05$).

Distance d'essai :

Distance parcourue par la main droite pour un essai. Il y avait un effet principal significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 414.62$, $p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 19.79$, $p < .0001$) et *espacement* ($F_{1,9} = 111,324$, $p < .0001$) sur la *distance de la main droite* avec les interactions : *synchronisation* × *direction* ($F_{18,162} = 5.961$, $p < .0001$) et *synchronisation* × *espacement* ($F_{3,27} = 27.863$, $p < .0001$).

Sans surprise, des tests post-hoc ont révélé que *1HL* produisait une distance de main droite significativement plus courte que la synchronisation des mains restantes ($p < .05$). Nous avons également constaté que pour toutes les directions, *1HR* produisait une distance d'essai à droite significativement plus longue que les conditions à deux mains ($p < .05$). *2HA* a produit une distance pour la main droite significativement plus longue que *2HS* pour toutes les directions sauf LDF ($p < .05$). Nous avons également constaté que lors de l'utilisation de *1HR*, les directions FN et LR (respectivement UD) produisaient une distance plus courte que les directions LDF, LDN, LUF et LUN (respectivement LDF, LUF et LUN). Lors de l'utilisation de *2HS*, les directions FN et UD ont produit une distance pour la main droite significativement plus courte que LDF, LDN, LUF et LUN ($p < .05$). Lors de l'utilisation de *2HA*, la direction UD a produit une distance pour la main droite significativement plus courte que les directions LDN, LR et LUF ($p < .05$).

Pour *1HR* et *2HS*, nous avons constaté qu'un petit espacement produisait une dis-

3.9. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 3 - CONTRÔLÉE

tance significativement plus courte qu'un large espacement ($p < .05$). Pour les deux espacements, nous avons constaté que les différentes conditions de synchronisation des mains produisaient une distance parcourue par la main droite significativement différente avec *1HL* qui produisaient les distances les plus courtes suivies de *2HS* puis de *2HA* et enfin de *1HR* ($p < .05$).

Distance parcourue par la main gauche pour un essai. Il y avait un effet principal significatif de *synchronisation* ($F_{3,27} = 525.89, p < .0001$), *direction* ($F_{6,54} = 17.663, p < .0001$) et *espacement* ($F_{1,9} = 95,2425, p < .0001$) sur la distance pour la main gauche avec les interactions: *synchronisation* \times *direction* ($F_{18,162} = 8.060, p < .0001$), *synchronisation* \times *espacement* ($F_{3,27} = 62.216, p < .0001$) et *synchronisation* \times *direction* \times *espacement* ($F_{18,162} = 3.105, p < .0001$) interactions.

Sans surprise, des tests post-hoc ont révélé que *1HR* produisait une distance d'essai pour la main gauche significativement plus courte que les autres conditions de synchronisation des mains indépendamment de la direction du mouvement et de l'espacement des cibles. Nous avons également constaté que *1HL* produisait une distance d'essai à gauche significativement plus longue que les deux conditions à deux mains indépendamment de la direction du mouvement et de l'espacement des cibles ($p < .05$). *2HA* a produit une distance pour la main gauche significativement plus longue que *2HS* pour les directions FN, LDN, LUF et UD lorsque l'espacement est large et pour toutes les directions lorsque l'espacement est petit ($p < .05$).

Lors de l'utilisation de *1HL*, un petit espacement produit une distance plus courte qu'un large espacement indépendamment de la direction. Aussi, nous avons trouvé pour *1HL* dans un petit espacement, les trois directions principales FN, LR et UD produisaient une distance d'essai pour la main gauche plus courte que les quatre diagonales restantes ($p < .05$). En espacement large, comme pour le petit, les quatre diagonales produisaient une distance d'essai pour la main gauche plus longue que les trois directions principales mais nous avons également trouvé que LUN produisait une distance plus longue que LDN et LUF ($p < .05$).

De plus, avec *2HA*, pour les petits espacements, les directions UD (respectivement FN) produisaient une distance d'essai gauche significativement plus courte que les directions LDN, LR, LUF et LUN (respectivement LDN) ($p < .05$). Alors que pour les grands espacements, les directions LUF (respectivement LDN) produisaient une distance d'essai pour la main gauche significativement plus longue que les directions LDF, LR, LUN et UD (respectivement LDF, LUN) ($p < .05$).

<i>Cumul</i>	Overall		1HR		1HL		2HS		2HA	
	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L	B. R	B. L
Borg (B.)										
Distance	.299	.266	.601	-.129	-.066	.564	.431	.458	.288	.348
Dist. R	.458	-.178	.603	-.112	-.226	.348	.433	.462	.285	.339
Dist. L	-.096	.521	.387	-.290	-.046	.580	.428	.454	.288	.356
Temps	.379	.36	.665	-.002	.002	.624	.553	.573	.385	.426

TAB. 3.3 – Résultats des corrélations.

3.9.3 Corrélations entre Performances & Fatigue Perçue

Comme dans l'expérience 1, nous calculons la corrélation de Spearman entre les différentes mesures de performances des utilisateurs et la fatigue perçue par les participants pour le bras droit et le bras gauche (voir le tableau 3.1). Dans l'ensemble, nous avons constaté que la distance cumulée droite est modérément corrélée à la fatigue du bras droit ($r = .458$, $p < .001$). De même, la distance cumulée gauche était largement corrélée à la fatigue du bras gauche ($r = .521$, $p < .001$) (voir Tableau 3.3). En ce qui concerne les corrélations pour les conditions de synchronisation de chaque main, nous avons constaté que pour les conditions à une main (1HR et 1HL), il existe une grande corrélation entre la distance cumulée de la main utilisée et la fatigue perçue par le bras respectif. Nous avons également trouvé une forte corrélation entre le temps et la fatigue perçue par le bras utilisé. Ceci suggère que plus la distance parcourue cumulée/temps cumulé augmente, plus la fatigue perçue du bras utilisé augmente. Pour les conditions à deux mains (2HA et 2HS), nous avons trouvé des corrélations modérées entre toutes les caractéristiques et la fatigue perçue par les deux bras.

3.9.4 Données Qualitatives et Retours Utilisateurs

Dans cette section, nous avons accompagné nos données quantitatives de données qualitatives qui capturent le modèle mental des utilisateurs lorsqu'ils effectuent la tâche de pointage composite et estiment leur niveau de fatigue. Premièrement, nos participants ont utilisé trois des cinq stratégies relevées dans l'expérience 1 pour réduire la fatigue de leurs bras, à savoir (1) redresser le buste, (2) balancer le haut du corps et le dos et (3) utiliser le poignet (voir Section 3.4.4). De plus, deux nouvelles stratégies ont été observées :

- **Modification de l'articulation du mouvement :** la plupart de nos participants ont trouvé que selon la direction du mouvement, la tâche pouvait être physiquement exigeante pour les épaules, ce qui augmentait la fatigue perçue des bras et par conséquent ils modifiaient l'articulation de leur mouvement

en utilisant davantage le coude. Cette stratégie est utilisée pour toutes les synchronisations des mains mais dépend de la direction du mouvement. Par exemple, un participant utilisant le *1HR* tout en se déplaçant dans la direction LDF a déclaré “selon la direction, la tâche implique différents muscles. Par exemple, pour la direction actuelle, il n’y a que le coude qui bouge donc ce n’est pas vraiment fatiguant. Cependant, lorsque je me déplace verticalement, mon dos ne peut pas aider le mouvement donc les épaules sont très fatiguées, c’est pourquoi je modifie mon mouvement et utilise davantage le coude.”

- **Repos du bras pendant la tâche :** nos participants ont commenté qu’en pointant sur les cibles du bas, ils profitent de cette situation pour reposer le bras utilisé. Un participant utilisant *1HR* avec la direction LR et un espacement large a dit “ici, mon bras est capable de se reposer parce que mes coudes sont collés à mon ventre lorsque je sélectionne les cibles du bas.” De plus, lors de l’utilisation de *2HA*, nos participants ont commenté que cette condition répartissait la tâche entre les mains de manière asynchrone, cela leur permettait de reposer leur bras pendant que le second effectuait la tâche, ce qui réduisait la fatigue perçue. Une citation : “Je pose ma main sur mon genou pour me reposer pendant que l’autre travaille.”

De plus et de manière intéressante, nos participants ont trouvé que la tâche est plus facile et moins fatigante lorsqu’ils utilisent la condition de mouvements asynchrones à deux mains que lorsqu’ils utilisent les autres conditions de mains car ils ont pu reposer leur bras non utilisé quelle que soit la seconde main effectuant la tâche. Quelques citations : “l’alternance des mains ne fatigue pas beaucoup car il y a toujours un bras au repos lorsque l’autre termine l’exercice” et “utiliser les deux mains en alternance est beaucoup plus facile que d’utiliser une seule main sur la tâche ou les deux mains en même temps”. Ce retour est corrélée avec nos résultats de l’expérience 2 où nos participants ont choisi d’alterner leurs mains chaque fois qu’ils sentaient que la fatigue perçue de leur bras augmenterait. En revanche, nos participants ont estimé que la condition *2HS*, si elle était plus rapide car chaque main faisait en même temps une partie de la tâche, était également la plus fatigante à la fois pour les bras et le dos justement parce que les deux bras étaient continuellement sollicités. De plus, nos participants ont estimé que la synchronisation *1HL* est également une condition difficile et fatigante car “seule la main non dominante est utilisée”.

Encore une fois, comme dans l’expérience 1, nos résultats indiquent que la direction horizontale FN doit être préférée tandis que les directions diagonales doivent être utilisées avec précaution, en particulier pour les diagonales qui demandent l’extension du bras (LUF et LDN). Cependant, contrairement à l’expérience 1, pour la direction UD, nos résultats indiquent que si c’est une direction fatigante, c’est la direction la plus efficace en particulier pour les conditions à deux mains. Ces résultats pourraient s’expliquer par le fait que la tâche est parallèle au corps de

l'utilisateur et est symétrique. Par conséquent, le plan frontal pourrait être exploité pour un exercice de courte durée, à condition que la tâche soit symétrique et puisse être exécutée par les deux mains. Cependant, lors du déplacement des mains dans la direction LR, nos résultats indiquent que la tâche est très compliquée, en particulier lors de l'utilisation de 2HS. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'avec cette direction, l'utilisateur doit avoir une main au-dessus de l'autre et le mouvement n'est plus symétrique ce qui complique l'exercice. Par conséquent, pour les tâches bimanuelles synchrones, la direction LR doit être évitée autant que possible.

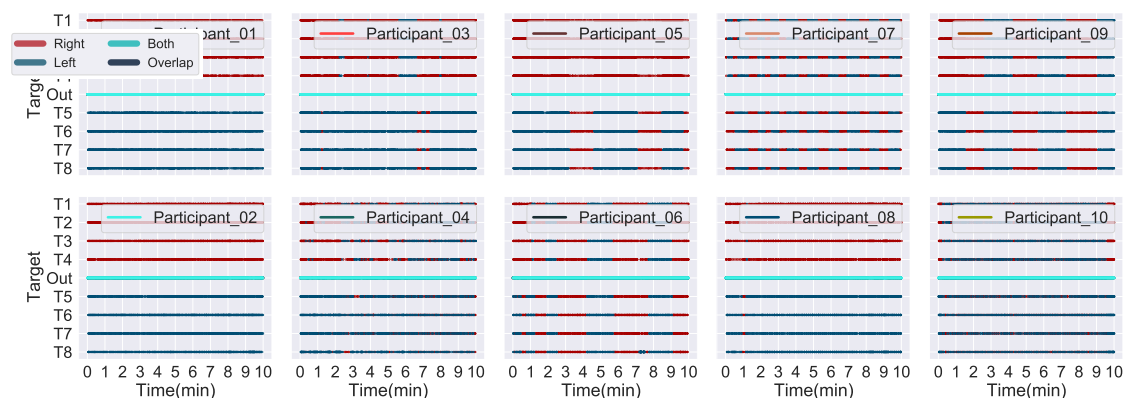
Enfin, pour la distance d'espacement entre les deux lignes de cibles, neuf de nos participants ont exprimé leur préférence pour la plus petite par rapport à la plus large car ils ont trouvé la large plus exigeante : "cela demande plus d'efforts physiques et de temps pour réaliser la tâche". Par exemple, un participant a dit : "l'espacement large m'oblige à tourner la tête pour suivre le mouvement sur les lignes et cela conduit à plus d'erreurs et donc c'est plus compliqué que le petit". Le dernier participant a trouvé l'espacement large "plus attrayant car il nécessite plus de réflexion et est donc moins ennuyeux."

3.10 Expérience 4 : Synchronisations des Mains Libres dans une Tâche de Pointage Composite

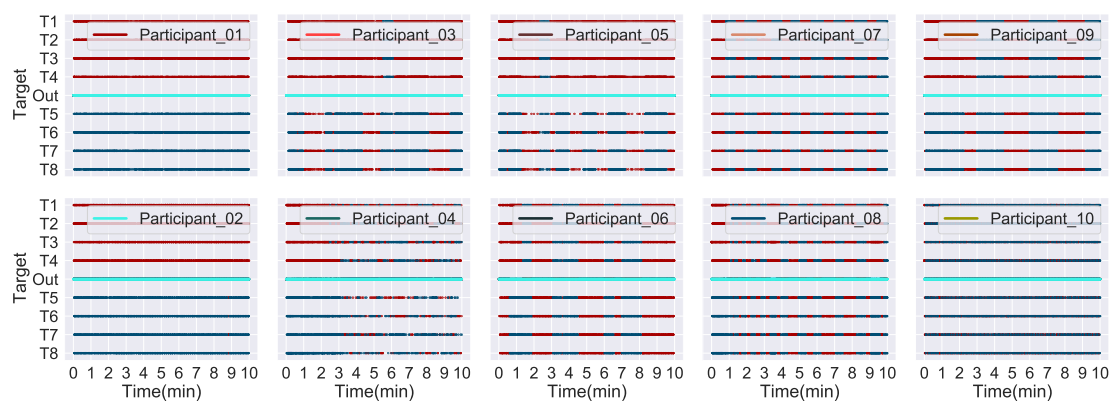
Notre expérience précédente (cf. section 3.8) a évalué chaque synchronisation de mains séparément. Ce faisant, nous sommes en mesure de comprendre les avantages et les inconvénients de chaque synchronisation des mains. Cependant, pour mieux comprendre l'évolution de la fatigue du bras lors d'une tâche de pointage composite en fonction des préférences de l'utilisateur, nous avons conçu une expérience de synchronisation mains libres.

À la fin de l'expérience 3, les dix participants sont revenus un jour de plus pour effectuer une tâche de pointage composite mains libres. La tâche était identique à l'expérience précédente *i.e.*, tâche de pointage mais pendant 10 minutes par espacement. Nous n'avons testé qu'un seul axe de direction et sélectionné la direction UD pour essayer de fatiguer le participant le plus possible (étant donné qu'il a été montré que les mouvements sur un plan verticale produisait plus de fatigue à cause de l'élévation du bras [9]) et de le forcer à trouver des stratégies pour ne pas trop vite se fatiguer le bras. Les participants ont ensuite été invités à effectuer la tâche aussi rapidement et précisément que possible tout en étant libres d'utiliser la ou les mains et la ou les synchronisation des mains qu'ils préféraient. Comme dans l'expérience 2, les participants pouvaient passer d'une synchronisation de mains à une autre chaque fois qu'ils se sentaient fatigués. Les participants n'étaient pas non

3.11. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 4 - LIBRE



(a) *Espacement : Large*



(b) *Espacement : Petit*

FIG. 3.13 – *Utilisation des mains sur l'intégralité de la durée de l'exercice.*

plus obligés d'utiliser toutes les synchronisations possibles des mains s'ils n'en resentaient pas le besoin et ils pouvaient évidemment en proposer des personnalisées. Enfin, nous avons demandé aux participants d'évaluer la fatigue de leurs bras droit et gauche au moins toutes les 15 secondes.

3.11 Résultats de l'Expérience 4 - Libre

Cette fois, nous avons observé différentes stratégies d'utilisation des mains et de leur synchronisation afin d'effectuer la tâche rapidement et avec précision tout en limitant la fatigue perçue de leurs bras droit et gauche. Cependant, et malgré le fait que la tâche soit composée de deux séquences de cibles sur lesquelles pointer, neuf de nos participants n'ont pas utilisé les mouvements synchrones à deux mains car

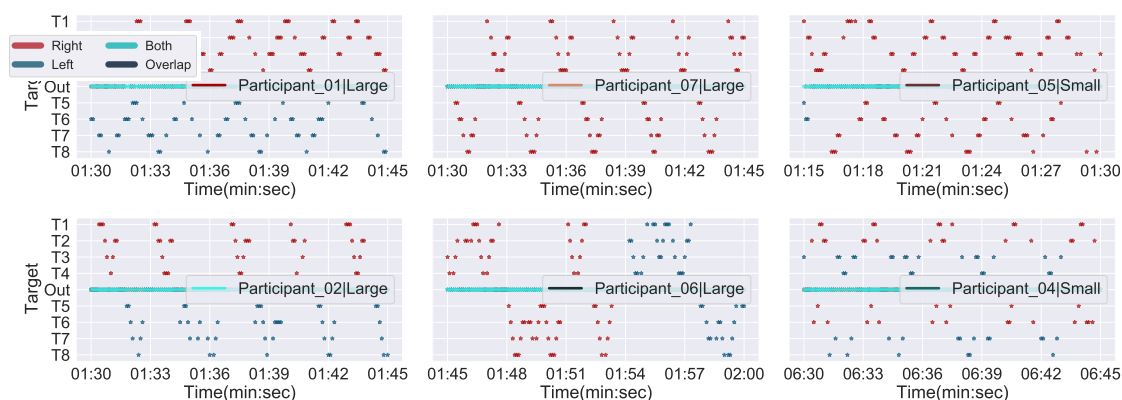
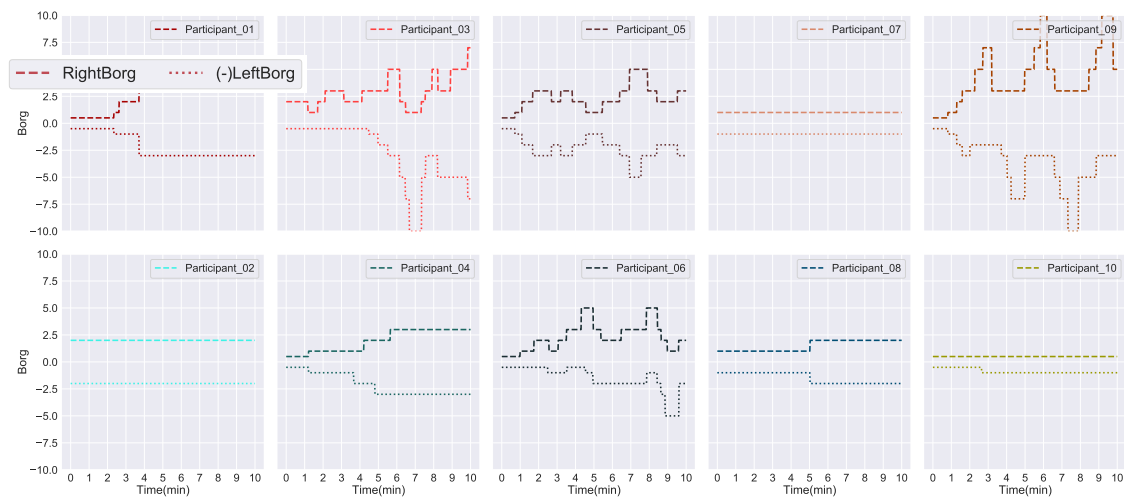


FIG. 3.14 – Zoom sur l'utilisation des mains des participants P1, P2, P7, P6, P5 et P4 qui représentent les différentes stratégies : utilisation de 2HS pour P1-Large, de 2HA pour P2-Large, de 1HR pour P7-Large, principalement utilisation de 1HR ou 1HL mais "améliorés" i.e. commence l'essai suivant par la ligne qui vient d'être terminée pour P6-Large, technique spéciale où la main passe d'une ligne à l'autre à chaque cible pour P5-Petit et de 2HO alternatif pour P4-Petit

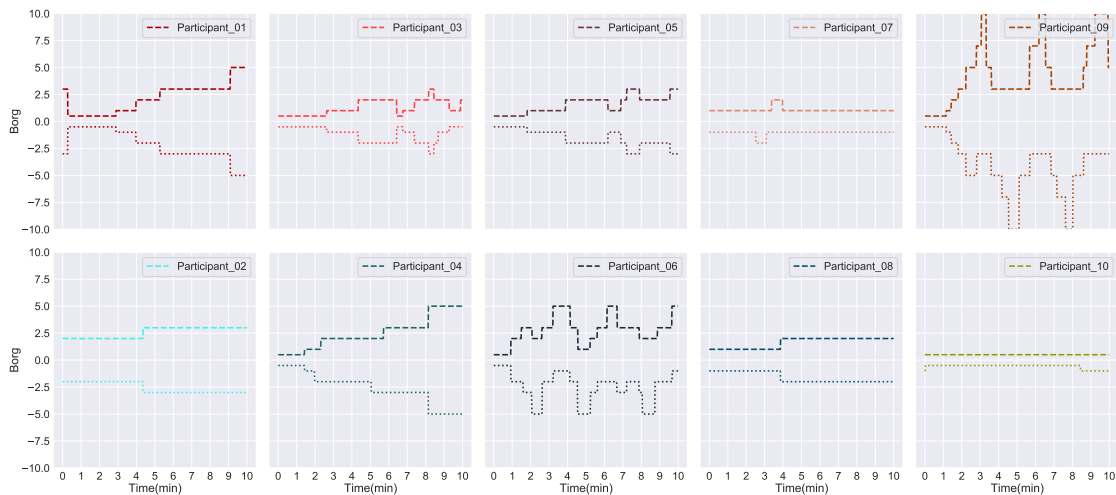
ils ont préféré alterner la fatigue perçue entre les mains pendant la tâche afin de ne pas fatiguer les deux mains simultanément. Un seul participant (P1) a utilisé des mouvements synchrones à deux mains (2HS) et il a utilisé cette synchronisation des mains sur toute la tâche (pour les conditions d'espacement large et petit). Pour ce participant, la fatigue perçue pour les deux bras n'a pas dépassé le niveau de modéré pour la condition d'espacement large. Cependant, pour la condition d'espacement petit, sa fatigue perçue est passée d'extrêmement faible(0.5) à modérée (3) puis forte (5) à 9min.

Huit de nos participants (P3, P5, P6, P7, P9 et P10 sur toute la tâche, P4 pour la condition de large espacement et P8 pour la condition de petit espacement) ont utilisé principalement la synchronisation à une main tout en alternant entre les conditions 1HR et 1HL. Comme dans l'expérience 2, quatre (P4, P7, P10 et P9) d'entre eux ont utilisé la même main pendant une courte période de temps inférieure à une minute (P4 environ 15 s, P7 environ 30 s, P9 environ 1 min 30 s et P10 changeaient principalement toutes les 1 ou 2 essais) puis ils sont passés à l'autre main et ainsi de suite. Pour trois de ces participants (P4, P7, P10), la fatigue perçue ne dépassait pas un niveau modéré (3). Cependant, pour P9 qui a alterné moins fréquemment que les trois autres participants, il a atteint le plus haut niveau de fatigue perçue et a expliqué : "J'ai essayé d'utiliser mes deux mains simultanément mais c'était trop fatiguant alors j'ai décidé de changer de main quand je me sentais très ou extrêmement fatigué". Pour les deux participants suivants (P6 et P8), ils ont utilisé principalement la synchronisation à une main avec une optimisation, i.e.

3.11. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE 4 - LIBRE



(a) *Espacement : Large*



(b) *Espacement : Petit*

FIG. 3.15 – Valeurs pour la fatigue perçue du bras droit et gauche de chaque utilisateur. Par souci de clarté, les valeurs de fatigue du bras gauche sont affichées en valeurs négatives mais sont en réalité positives.

lorsqu'ils ont terminé un essai sur la séquence de cibles de gauche, ils ont commencé le suivant sur la séquence de cibles de gauche et vice versa. Le participant P6 a alterné entre les mains droite et gauche moins fréquemment que P8 et sa fatigue perçue a augmenté et diminué alternativement entre très faible (1) et forte (5) tandis que pour P8 la fatigue perçue était stable de faible (2) à modérée (3). Pour P3 et P5, ils n'ont pas suivi la méthode classique pour terminer les essais. Au lieu de suivre une séquence de cibles comme nous l'avions défini pour l'expérience 3, ils vont et

viennent entre les deux séquences de cibles (*p.ex.*, T1, T5, T6, T2, T3, T7, T8, T4, T3, T7, T6 puis T2). Pour tous les deux sur le petit espacement, la fatigue augmentait et diminuait simultanément sur les deux bras et n'excédait pas un niveau modéré (3). Cependant, pour une condition de large espacement, P5 a eu un comportement similaire mais sa fatigue perçue a atteint un niveau de fatigue forte (5). Pendant ce temps, P3 a eu un pic de fatigue au bras gauche probablement causé par une utilisation exclusive du bras gauche pendant environ une minute autour de la 7ème minute d'exercice.

Deux participants (P2 sur toute la tâche et P8 pour la condition de grand espacement) ont utilisé principalement le mouvement asynchrone des deux mains (2HA) avec une optimisation de la fatigue de leurs bras en commençant l'essai suivant avec la dernière main utilisée dans le dernier essai. Par exemple, pour le premier essai, ils ont commencé en sélectionnant la bonne séquence de cibles avec leur main droite, puis la séquence de cibles gauche avec leur main gauche, puis pour l'essai suivant, ils ont commencé par la séquence de gauche et la main gauche et ainsi de suite (1HR-1HL; 1HL-1HR; 1HR-1HL; etc.). Par conséquent, leurs bras ne bougeaient pas en même temps ce qui permettait de reposer une main pendant que l'autre faisait la tâche impliquant une fatigue perçue stable des bras sur la tâche entre 2 (faible) et 3 (modérée).

Enfin, un participant (P4), pendant la condition de petit espacement, a utilisé une technique comparable aux mouvements ordonnés à deux mains (2HO) de l'expérience 1 mais il a alterné entre les mains gauche et droite toutes les deux cibles. Pour ce participant, la fatigue perçue a augmenté de manière similaire pour les deux bras de 0.5 à 5 à la fin de l'expérience.

3.12 Discussion pour les Expériences 3 & 4

Notre deuxième paire d'expériences fournit des informations sur l'effet de la synchronisation des mains sur la fatigue perçue par l'utilisateur lors de l'exécution d'une tâche de pointage composite (deux lignes séquentielles). Dans ce qui suit, nous discutons de nos résultats et de nos suggestions sur la façon d'appliquer ces résultats.

3.12.1 Fatigue et Interfaces Gestuelles en VR

Dans l'ensemble, nous avons trouvé que les participants étaient modérément en accord lors de l'évaluation de la fatigue perçue des bras droit et gauche pendant la tâche de pointage composite et sous diverses synchronisations des mains, diverses directions de mouvement et divers espacements, comme indiqué par les coefficients

de concordance W de Kendall ($> .4$). Le degré de consensus plus faible par rapport à la première expérience suggère que la tâche de pointage composite est un facteur ayant une plus forte influence sur la fatigue perçue du bras que la tâche de pointage simple. De plus, comme dans l'expérience 1, nos résultats indiquent que plus la période de temps est haute, plus le consensus entre les notes des participants est élevé avec une fatigue perçue plus forte lors des dernières périodes de temps.

Les conditions à une main ($1HR$ et $1HL$) étaient plus fatigantes pour le bras correspondant que les conditions à deux mains ($2HS$ et $2HA$) en particulier pour les dernières périodes de temps et pour la direction verticale et/ou les directions diagonales qui demandent une extension maximale du bras utilisé (*p.ex.*, LUF pour $1HR$). Nos résultats indiquent également que pour toutes les synchronisations de mains, ces directions sont les plus fatigantes. Ces résultats sont cohérents dans différentes conditions d'espacement et sont également corrélés à la fois aux résultats de [9] et à nos résultats de l'expérience 1. Par conséquent, les directions horizontales doivent être privilégiées dans la mesure du possible.

Malgré le fait que nos résultats indiquent que les conditions à deux mains étaient moins fatigantes que celles à une main, dans notre expérience libre, la plupart de nos participants ont utilisé des conditions à une main tout en alternant entre la main droite et la main gauche chaque fois qu'ils ressentaient leur fatigue augmenter. Ce faisant, pour la plupart des participants, la fatigue perçue du bras n'a pas dépassé un niveau de fatigue modéré. Ces résultats sont corrélés aux résultats dans notre expérience 2 qui a confirmé que les concepteurs devraient penser à un système d'interaction flexible en permettant aux utilisateurs d'alterner entre les mains aussi souvent qu'ils en ont besoin, dès lors qu'aucune synchronisation spécifique n'est requise. Cependant, mais de manière intéressante, nos résultats indiquent que lorsque la synchronisation des mains est un paramètre prédéfini comme dans l'expérience 3, les utilisateurs préfèrent la condition $2HA$ car (1) la tâche est divisée en deux parties exécutées séquentiellement et de telle sorte que chaque partie nécessite l'utilisation d'une main différente à la fois, ce qui permet à un bras de se reposer pendant que l'autre travaille et par conséquent de réduire la fatigue perçue et (2) chaque main a effectué la partie de la tâche qui lui est proche ce qui rend la tâche plus facile à faire. Ces résultats sont en désaccord avec nos résultats de l'expérience 1 où nos participants ont préféré utiliser la main dominante lorsque la synchronisation des mains devrait être un paramètre défini, mais cela semble correspondre à ce que nous avons dans l'expérience 2 où certains participants changeaient de main à chaque essai. Ce désaccord pourrait s'expliquer par le fait que dans l'expérience 1, la condition $2HA$ n'est pas évaluée, les participants alternant les mains pour chaque nouvelle cible pointée et non pour chaque nouvel essai. En plus, la tâche est une tâche de pointage simple qui ne nécessite pas les deux mains comme commenté par nos participantes. Par conséquent, dans le cas où la synchronisation des mains doit être un paramètre prédéfini et que la tâche peut être effectuée avec les deux mains de telle sorte que

chaque main fasse une partie différente de la tâche, les concepteurs devraient préférer la condition de synchronisation 2HA tout en utilisant chaque main du côté qui lui est proche.

Comme dans l'expérience 1, nous avons de nouveau constaté que la distance parcourue cumulée droite et gauche et le temps cumulé sont les descripteurs les plus corrélés avec la fatigue perçue des bras droit et gauche. Nous avons également observé un ensemble de changements de postures corporelles et de stratégies utilisées par nos participants pour réduire la fatigue perçue des bras. Ces résultats sont corrélés avec nos résultats de l'expérience 1 et ont confirmé que la distance parcourue, le temps et le changement de posture corporelle pourraient être des indicateurs d'une augmentation de la fatigue des bras.

3.12.2 Compromis Performance/Fatigue

Les conditions à deux mains étaient non seulement moins fatigantes mais aussi plus efficaces. Par exemple, *2HS* est la synchronisation de main la plus rapide. Elle produit plus d'essais que les conditions de mains restantes, implique une distance droite plus courte que *1HR* et *2HA* et une distance gauche plus courte que *1HL* et *2HA*. Ces résultats ne sont pas cohérents entre les différentes directions, en particulier pour les directions LDF et LR. Ces résultats ne sont pas surprenants car avec *2HS*, les participants ont complété simultanément les deux lignes de cibles tandis que dans les autres conditions, les participants ont complété séquentiellement les deux lignes de cibles. Ces résultats sont également corrélés aux résultats de Rekik et al. [135, 136] pour les surfaces tactiles. Par conséquent, les mouvements synchrones à deux mains pourraient être autant exploités que les synchronisations à une main. Ces conditions sont perçues comme n'étant pas plus fatigantes à utiliser et permettent un gain d'efficacité. Cependant nous limiterons ces résultats au cadre où la tâche est symétrique et peut être effectuée par deux mains simultanément tandis que chaque main est affectée une partie différente de la tâche. Aussi, le concepteur doit éviter d'utiliser les interactions synchrones à deux mains pendant une longue période, car dans notre expérience libre, nos participants ont préféré ne pas fatiguer les deux mains en même temps.

Nos résultats indiquent également que les mouvements asynchrones à deux mains sont plus rapides que les conditions à une main en particulier pour les directions diagonales qui demandent la plus grande extension du bras utilisé (*i.e.*, LUF pour *1HR* et LDN pour *1HL*) et pour les larges espacement pour *1HL*. De plus, *2HA* a produit des distances plus courtes que les conditions à une main pour leur main respective. Ce résultat est cohérent dans différentes conditions d'espacement et de direction. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que, comme avec *2HS*, pour la condition *2HA*, la latéralité de la main utilisée est respectée et la tâche est

répartie entre les deux mains qui collaborent pour l'effectuer, tandis qu'en condition à une main, toute la tâche est exécutée par la même main. Ces résultats confirment à nouveau que la condition *2HA* doit être privilégiée dès que la tâche peut être effectuée à deux mains chacune affectée à la partie de la tâche qui lui est proche. Il est également intéressant d'observer que cette synchronisation de mains a été utilisée par deux utilisateurs dans notre tâche libre mais avec une optimisation en commençant l'essai suivant du côté où l'essai en cours s'est terminé, suggérant que lorsque la tâche est répétitive, les concepteurs devraient envisager une entrée flexible en permettant aux utilisateurs de commencer par le côté qu'ils préfèrent pour le même essai. Et si une telle flexibilité n'est pas possible ou souhaitée, observer une large gamme d'utilisateur effectuer la tâche en laissant ce paramètre libre dans un premier temps permettrait potentiellement de proposer un système plus intuitif et moins fatigant pour l'utilisateur.

Pour les conditions à une main, nos résultats indiquent qu'il n'y avait pas de différence significative entre *1HR* et *1HL* en termes de performance et de fatigue. Cependant, comme dans l'expérience 1, nos participants préfèrent utiliser leur main dominante (ici la main droite).

Encore une fois, comme dans l'expérience 1, nos résultats indiquent que la direction horizontale FN doit être préférée tandis que les directions diagonales doivent être utilisées avec précaution, en particulier pour les diagonales qui demandent l'extension du bras (LUF et LDN). Cependant, contrairement à l'expérience 1, pour la direction UD, nos résultats indiquent que si c'est une direction fatigante, c'est la direction sur laquelle les participants sont les plus efficaces en particulier pour les conditions à deux mains. Par conséquent, la direction UD pourrait être exploitée pour un exercice de courte durée, tant que la tâche est symétrique et peut être effectuée par les deux mains. Cependant, lors du déplacement des mains dans la direction LR, nos résultats indiquent que la tâche est très compliquée, en particulier lors de l'utilisation de *2HS*. Ce résultat est cohérent avec nos précédentes justifications puisque dans cette direction, nous perdons la symétrie qui permettait de respecter la latéralité des mains.

Enfin, nos résultats indiquent qu'un petit espacement (10 cm) est plus rapide et produit plus d'essais qu'un large (40 cm) en particulier lors de l'utilisation de *2HS* et des deux conditions à une main. Un petit espacement était également préféré par nos participants. Par conséquent, dès que possible, le concepteur devrait préférer un petit espacement à un large lorsque la tâche est composée de deux sous-tâches symétriques.

3.13 Limitations

Comme toute étude, la nôtre présente des limites. Par exemple, nos participants étaient plus jeunes que la moyenne de la population, étaient tous droitiers et étaient tous des hommes. Il se pourrait que les personnes âgées, les enfants, les femmes ou les gauchers se comportent différemment. De plus, nous avons des participants de gabarits différents alors que toutes les dimensions de nos expériences étaient fixées en fonction de tailles moyennes. Certains participants pouvaient donc avoir plus de facilité que d'autres à atteindre certaines cibles placées au loin ou en hauteur. En outre, nous n'avons que dix participants par paire d'expériences *i.e.* dix pour les expériences 1 et 2 et dix autres pour les expériences 3 et 4. Cela peut sembler peu mais cela représente un temps de passage d'expérience en cumulé particulièrement long. Il n'était donc pas envisageable pour ces expériences de faire passer beaucoup plus de participants. Aussi, comme nous l'avons vu dans nos résultats, il semblerait que 2 minutes par condition, dans les expériences à synchronisation contrainte, serait potentiellement trop court. Nous répondons partiellement à ce point avec nos expériences à synchronisation libre. Cependant, celles-ci ont à chaque fois été effectuées après celles à synchronisation contrainte ce qui pourrait avoir généré un biais. Ces questions méritent d'être étudiées, mais dépassent le cadre des travaux actuels.

3.14 Conclusion et Travaux Futurs

Suite à l'évaluation de la fatigue des bras perçue par les utilisateurs au travers d'exercices de pointage simple ou composite en RV, nous avons décelé quelques suggestions qui pourront aider à la conception d'applications de RV moins fatigantes voir à fatigue contrôlée. Pour optimiser la relation entre fatigue et efficacité, il semblerait nécessaire de **sélectionner la synchronisation de mains par rapport à la tâche effectuée** *i.e.* favoriser l'utilisation d'une seule main lorsque l'interaction est simple et pour des tâches composites, favoriser l'utilisation de deux mains synchrones sur une courte période de temps ou de deux mains asynchrones. Par ailleurs, il pourrait être souhaitable d'**offrir à l'utilisateur la possibilité d'utiliser ses mains comme il le souhaite** *i.e.* alterner quand il le veut ou prendre des pauses, afin qu'il puisse auto-réguler sa fatigue. De plus, **la distance parcourue par la main et des modifications de la posture de l'utilisateur pourraient être des indicateurs de fatigue**. En outre, on constate que les directions de mouvement suivant l'axe vertical et certaines diagonales, sont plus fatigantes que celles du plan horizontal ce qui suggère qu'il vaudrait mieux **favoriser l'utilisation des directions horizontales**.

Les possibilités de futurs travaux sur la question de la fatigue en mid-air et

3.14. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS

plus particulièrement en RV sont nombreuses et les recherches que nous venons de présenter en ouvrent de nouvelles. Premièrement, il serait intéressant de répliquer ces expériences tout en prenant en compte les limitations précédemment présentées. Par exemple, pour la limitation sur le gabarit du participant, serait de proposer une calibration pour faire varier la disposition des cibles en fonction. Aussi, nous n'avons choisi que quatre synchronisations de mains par expérience pour celles qui étaient contraintes (*i.e.* la 1 et la 3). Nous avons également utilisé seulement deux conditions d'espacement dans les troisième et quatrième expériences. D'autres synchronisations de mains et d'autres conditions d'espacement pourraient impliquer des résultats différents, il serait donc intéressant d'étudier plus amplement le sujet mais il faudra alors se contenter par exemple de fixer une seule direction de mouvement ce qui permettrait de réduire drastiquement le temps de l'expérience et laisserait plus de place pour d'autres synchronisations. Ensuite, dans l'optique de produire un nouvel estimateur de la fatigue musculaire des bras, nous pourrions utiliser nos données de capture des mouvements des utilisateurs et d'évaluation de la fatigue. Nous pourrions alors également inclure cette mesure dans des applications de RV plus variées pour l'éprouver et la valider. Une telle mesure permettrait alors de contrôler la fatigue des utilisateurs ce qui permettrait par exemple de proposer des exercices de rééducations plus efficaces puisqu'on pourrait fixer des objectifs de fatigue plutôt que de temps ou de nombres de répétitions de l'exercice.

De plus, nous pourrions essayer d'évaluer la fatigue physique au regard de la fatigue mentale sur des tâches plus ou moins répétitives et plus ou moins engageantes. Enfin, pour aller plus loin dans notre exploration de la fatigue, nous pourrions nous pencher sur l'influence de certains aspects de conception de jeux ou sur l'influence de la musique et du rythme sur la fatigue des bras perçue par les utilisateurs. Ce sera d'ailleurs cette dernière piste que nous explorerons dans le prochain chapitre de cette thèse.

Chapitre 4

Étude de l'Impact du Rythme lors d'une Interaction Mid-air sur l'Expérience Utilisateur au Regard de la Fatigue Perçue des Bras

4.1 Introduction

Durant nos expériences sur les synchronisations uni/bi-manuelles (voir Chapitre 3), nous avons observé que les participants auraient apprécié avoir du son pour garder un certain rythme dans la réalisation de la tâche demandée. Aussi une des limitations que nous avons relevée, était que tous les participants ne parcouraient pas la même distance avec leur main puisqu'ils étaient limités en temps mais pas contraint en vitesse. Or comme la fatigue semble être corrélée à cette distance, il serait intéressant de fixer la vitesse de déplacement de la main afin d'observer les variations de fatigue à distance parcourue égale entre les participants. De plus, des études tendent à montrer que la musique et le rythme pourraient améliorer les performances et diminuer la fatigue des personnes lors de différentes tâches demandant un effort physique. Ce second chapitre vient donc compléter notre compréhension de la fatigue des bras et plus largement de l'expérience utilisateur lors de l'interaction en RV en y ajoutant du rythme via sa régularité, sa vitesse et un guide sonore.

Nous espérons avec cette expérience montrer qu'une interaction rythmée et accompagnée de son pourrait diminuer la fatigue et permettre aux utilisateurs d'interfaces mid-air d'interagir plus longtemps de manière confortable.

4.2 État de l'art

4.2.1 Musique et fatigue

Dans notre état de l'art introductif nous avons vu pourquoi et comment mesurer la fatigue musculaire des bras lors d'interactions mid-air. Cependant nous n'avions pas encore évoqué le fait que de manière remarquable, la fatigue perçue s'avère affectée par la musique. Par exemple, Szmedra et al. [160] ont démontré qu'écouter de la musique en courant diminue la fatigue musculaire perçue. Williams et al. [174] ont montré que la musique générative avec un rythme synchronisé à la cadence des coureurs peut améliorer leurs performances mais aussi diminuer leur effort perçu. Il semblerait également qu'écouter de la musique relaxante après un effort physique aiderait à récupérer plus rapidement [85]. Aussi, dans le cadre de la fatigue cognitive, la musique relaxante améliorerait les performances et diminuerait la fatigue [69]. Enfin, l'étude de Potteiger et al. [132] montrerait que il n'y aurait pas de différence significative en terme de fatigue entre plusieurs types de musique mais que dans tous les cas la musique permettrait de diminuer la fatigue ressentie.

Cependant, et malgré que le rythme et l'audio se soient avérés utiles pour réduire la fatigue dans des scénarios réels, aucune étude n'a examiné l'effet du rythme gestuel sur l'expérience utilisateur lors des gestes en mid-air en RV. En particulier des composants du rythme tels que la régularité, la vitesse, ainsi que la mise en évidence de ce rythme à l'aide de guides sonores que nous comptons étudier ici. Les travaux antérieurs sur le rythme dans les interfaces gestuelles et 3D se sont concentrés sur des utilisations autres que la réduction de la fatigue comme nous le verrons dans la prochaine section.

4.2.2 Interaction rythmée

Dans la plupart des systèmes interactifs, les utilisateurs ont un contrôle total sur l'exécution des automates d'application. Cependant, en RV et pour certains cas d'utilisation spécifiques, il est parfois possible que des contraintes de temps existent, *par exemple*, avec des minuteries pour la sélection basée sur le regard [80, 109, 164] ou les gestes de pose [75, 76, 171], ou dans certains jeux (standards tels que les jeux de rythme ou sérieux tels que des simulations). Pour une situation d'interaction dans laquelle il est raisonnable que l'application influence la vitesse à laquelle l'utilisateur interagit, et afin d'explorer des approches pour contrôler la fatigue d'interaction perçue, le rythme gestuel est l'une des voies d'exploration prometteuses, comme le préconise Costello [111]. Par exemple, Mueller et al. [119] ont proposé "d'aider les joueurs à identifier le rythme dans leurs mouvements", et de reconnaître le rythme

dans une séquence de gestes. Le rythme a également été utilisé comme moyen de saisir des commandes via des séquences de gestes de tapotement [63] ou avec des micro-gestes exécutés à un tempo donné [57] ou pour la sélection de cibles en suivant des trajectoires à une vitesse donnée avec gestes en mid-air [36, 166]. Dans les interfaces utilisateurs 3D, les guides sonores ont été principalement étudiés pour aider les utilisateurs malvoyants à trouver des cibles dans un environnement 3D [114, 146].

Dans ce contexte, entre autres questions fondamentales, on peut par exemple se poser les questions suivantes: Est-ce qu'imposer un rythme au geste a un effet sur la fatigue? Qu'est-ce qui rend l'articulation des gestes plus difficile? Qu'est-ce qui déclenche la fatigue perçue? Comment la vitesse des gestes affecte-t-elle l'expérience utilisateur? Y a-t-il un lien entre la régularité de la vitesse et la fatigue perçue? Les guides sonores aident-ils les utilisateurs à augmenter leur sentiment de présence et à diminuer la fatigue perçue?

Nous soutenons que le rythme dans les gestes en mid-air est un facteur qui pourrait jouer un rôle important dans l'amélioration de l'expérience utilisateur. Dans les applications rythmique en réalité virtuelle, l'UX comprenant la fatigue et la présence perçues, a été peu explorée jusqu'à présent et, par conséquent, peu comprise. Dans ce chapitre, nous avons mené une expérience pour examiner l'effet du rythme (en termes de vitesse, de régularité et de mise en évidence à l'aide d'un guide sonore) dans les gestes mid-air en RV sur l'expérience utilisateur et nous fournissons à la communauté une compréhension de ce phénomène.

4.3 Expérience

Nous avons mené une expérience pour mesurer l'effet du rythme lors d'une tâche de pointage en mid-air en RV sur l'expérience utilisateur. Nous avons décomposé cette dernière en termes de fatigue perçue par l'utilisateur, de présence, de difficulté, de succès et de ressentis de l'utilisateur vis-à-vis de la présence ou absence de son.

4.3.1 Participants

Quinze participants (12 hommes, 3 femmes) se sont portés volontaires pour participer à notre expérience. Ils étaient âgés de 18 à 45 ans (*moyenne* = 28.4, *sd* = 6.8). Treize participants étaient droitiers et deux gauchers. Deux participants se considéraient comme des experts dans la compréhension du rythme, sept comme compétents, trois comme intermédiaires et trois comme novices. Cinq participants se définissaient comme des experts en réalité virtuelle, trois participants l'utilisaient

4.3. EXPÉRIENCE

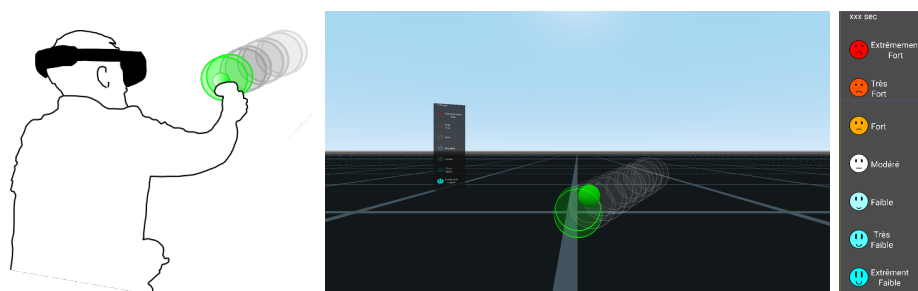


FIG. 4.1 – Montage expérimental. À gauche: participant assis avec un casque RV. Au centre: ce qu'ils ont vu, c'est-à-dire la fenêtre mobile de l'échelle Borg CR10 à gauche, le curseur sphérique au centre et la cible cylindrique avec sa trajectoire. À droite: panneau d'échelle Borg qui est affiché dans la scène.

fréquemment, six autres occasionnellement et le dernier ne l'avait jamais testé.

En raison de la pandémie COVID-19, une partie de cette expérience a été réalisée à distance avec sept participants qui possédaient un casque RV. Ils ont été recrutés via des listes de diffusion d'associations telles que l'[AFXR](#) (Association Française de Réalité Augmentée/Virtuelle/Mixte) et l'[AFIHM](#) (Association Française d'Interaction Humain-Machine) et des forums. Ces participants ont téléchargé le logiciel d'expérimentation qui était une application développée sous le moteur de jeu vidéo Godot et compilée pour fonctionner avec SteamVR et l'Oculus Quest. Ensuite, les participants ont effectué la tâche lors d'une visioconférence avec l'un des auteurs. Les huit autres participants ont réalisé l'expérience dans notre laboratoire et ont utilisé la version SteamVR de l'application et le casque Valve Index comme nous pouvons le voir sur la Figure 4.1. Nous avons suivi toutes les précautions sanitaires nécessaires, en particulier le nettoyage du matériel avant et après utilisation. Les casques utilisés par les participants étaient: 2× Oculus Quest 2, 1× Oculus Quest 1, 1× Oculus Rift S, 2× HTC Vive Pro et 8× Valve Index dans le laboratoire. Tous les participants ont signé un accord de consentement éclairé.

4.3.2 Design

L'expérience a utilisé une conception intra-sujets $2 \times 2 \times 2 \times 5$ pour les facteurs : *régularité*, *vitesse*, *son* et *période de temps*.

La première variable est la *régularité* du rythme du déplacement de la cible qui couvre deux conditions: *régulière* (il n'y a pas de changement de vitesse) et *irrégulière* (la vitesse est réduite aléatoirement de 0%, 5%, 10%, 25%, 50%, mais jamais augmentée pour éviter des vitesses plus élevées).

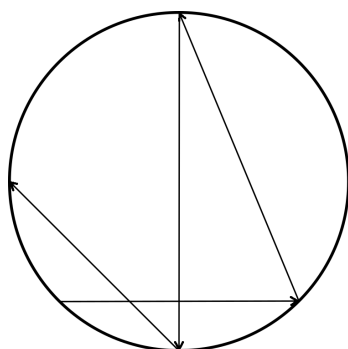


FIG. 4.2 – Déplacement possible de la cible suivant des cordes du cercle dans lequel elle est contrainte.

La seconde est la *vitesse* de déplacement de la cible à suivre qui couvre deux conditions: *lente* (1s = 4 temps = 1 trajectoire, *vitesse* = 1 m/s) et *rapide* (700ms = 4 temps = 1 trajectoire, *vitesse* = 1,4 m/s).

La troisième variable est la présence de *son* qui est joué au même rythme que le déplacement de la cible. Le *son* couvre deux conditions: *actif* (le retour audio est utilisé pour mettre en évidence le rythme, consistant en quatre sons joués par trajectoire, un à chaque battement) et *inactif* (pas de retour audio).

Enfin, nous avons la *période de temps* qui correspond à un ré-échantillonnage de la tâche en cinq périodes successives: 30-60, 60-90, 90-120, 120-150, 150-180 secondes. Nous avons volontairement supprimé la première période de temps 0-30 de notre analyse pour réduire le biais de vitesse et de précision lorsque nous commençons à suivre la cible au début de la tâche.

4.3.3 Tâche

Nous utilisons une tâche de pointage dans laquelle les participants devaient garder un curseur sphérique à l'intérieur d'une cible cylindrique se déplaçant sur le plan XY devant eux. La trajectoire de la cible était représentée par une trace derrière elle, indiquant la direction à suivre au participant. Le déplacement de cette cible était contraint sur les cordes d'un cercle dont le centre était situé à ($x = 0\text{cm}$, $y = 100\text{cm}$, $z = -46\text{cm}$) et avec un *rayon* = 50cm, comme présenté sur la Figure 4.2. La cible était un cylindre circulaire droit orienté côté circulaire face au participant avec un *rayon* = 25cm et une *hauteur* = 10cm. Le contrôleur/la main était représentée par une sphère de *rayon* = 5cm. Le résultat, dans l'application, est représenté sur la figure 4.1 et dans une courte vidéo que vous pouvez [télécharger ici](#) ou [voir ici](#).

4.3. EXPÉRIENCE

Label	Question
Post Fatigue	À quel point avez-vous trouvé cette tâche fatigante? (Borg CR10)
Présence	Moyenne des résultats de la partie Adaptation/Immersion du questionnaire de Présence [147].
Difficulté	Jusqu'à quel point avez-vous trouvé l'exercice difficile?
Succès	À quel point avez-vous eu l'impression de réussir l'exercice?
Entraînant	À quel point avez-vous trouvé le rythme entraînant?
Aide	Jusqu'à quel point le son vous a-t-il aidé à suivre la cible?

TAB. 4.1 – Questions utilisées pour évaluer l'expérience utilisateur. Pour la fatigue, nous avons utilisé le Borg CR10 [28] et pour les questions restantes, nous avons utilisé des questions sur une échelle de Likert en 7 points (de fortement en désaccord à fortement d'accord).

4.3.4 Procédure

Au début de l'expérience, les participants ont été invités à s'asseoir sur une chaise sans accoudoir pour ne pas être avantagé par rapport à d'autres participants en reposant leur bras dessus au cours de l'exercice. Et nous leur avons demandé de s'assurer d'avoir une zone dégagée devant eux afin d'éviter tout risque de collision lors de l'interaction avec l'application. Tous les participants ont ensuite mis leur casque RV. Les participants effectuant l'expérience à distance ont été invités à calibrer le plus précisément possible le sol et le centre de leur casque RV afin que la zone d'interaction soit la même pour tous (*i.e.* idéalement le point (0,0,0) de l'espace virtuel devrait correspondre au pied de la chaise utilisée). Lorsque les participants ont ouvert l'environnement virtuel, la tâche leur a été expliquée à la fois oralement et avec un texte sur un panneau virtuel. Les participants ont ensuite rempli un bref questionnaire démographique.

L'expérience a commencé par une phase d'apprentissage composée d'un bloc d'apprentissage avant de passer à la phase expérimentale composée de huit blocs. Dans les deux phases, les participants ont été invités à suivre la cible aussi précisément que possible avec leur main dominante. En parallèle, ils ont dû utiliser leur main non dominante pour signaler la fatigue perçue du bras sur l'échelle de Borg en utilisant le joystick du contrôleur. Cette échelle était affichée sur un panneau qui apparaissait toutes les 15 secondes sur le côté gauche de la zone d'interaction afin de rappeler aux participants de fournir des évaluations régulièrement et se déplaçait lentement hors du champ de vision des participants tout en disparaissant.

Après chaque essai, les participants devaient remplir un questionnaire composé de la partie Adaptation / Immersion du questionnaire de présence [147] avec des

questions supplémentaires sur leur niveau final de fatigue et sur leur perception de la tâche. Le tableau 4.1 fournit la liste des questions correspondantes. À la fin du questionnaire, les participants étaient invités à se reposer autant que possible afin de réduire l'effet de la fatigue accumulée. Les participants signalaient ensuite leur niveau initial de fatigue pour l'essai suivant. Lors des tâches, nous avons également enregistré (à une fréquence de $60Hz$) les positions de la main et de la cible, afin de récupérer la distance par rapport à la cible.

La phase d'entraînement a été conçue pour que les participants se familiarisent avec la tâche sans créer d'effet d'apprentissage ou d'ordre. Par conséquent, tous les participants ont réalisé un premier essai dans un état qui ne faisait pas partie de ceux que nous voulions comparer. Plus précisément, dans cette phase d'entraînement, nous avons alterné tous les 8 temps (2 trajectoires) entre les conditions *son actif* et *son inactif*, nous avons appliqué une *vitesse moyenne* ($850ms = 4temps = 1trajectoire$) et la *régularité* était *régulière*. Cela a permis aux participants de comprendre la relation entre leurs mouvements, le rythme imposé et le son, et de s'habituer à rapporter leur niveau de fatigue sur l'échelle de Borg.

Dans la phase d'expérimentation, les participants ont ensuite exécuté successivement huit blocs (2 *régularité* \times 2 *vitesse* \times 2 *son*). L'ordre des 8 blocs a été contrebalancé entre les participants par un carré latin équilibré, afin d'éviter un effet d'ordre sur la fatigue ou l'engagement. Pour chaque bloc, les participants ont complété les six périodes de temps pour un total de 180 secondes. Après chaque bloc, les participants ont fait une pause. L'expérience a duré environ une heure.

4.3.5 Hypothèses

Nous avons formulé les hypothèses suivantes sur l'effet du rythme sur l'expérience utilisateur. Tout d'abord, nous avons pensé qu'un rythme irrégulier serait plus amusant pour l'utilisateur mais sans doute plus compliqué à suivre et pourrait selon l'effet qui prédominerait aussi bien augmenter que diminuer la sensation de fatigue. Deuxièmement, nous avons émis l'hypothèse que lorsque la vitesse serait élevée, le participant aurait plus de difficulté à suivre la cible et qu'il serait plus fatigué car il aurait à parcourir plus de distance. Enfin, nous pensons que lorsqu'un son est joué, le participant est plus engagé dans l'expérience et devient plus performant en se fatigant potentiellement moins.

4.4. RÉSULTATS

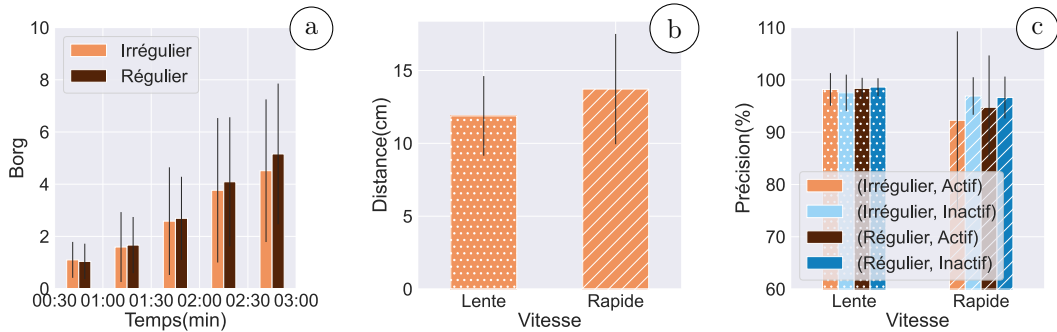


FIG. 4.3 – Résultats pour chacune des mesures dépendantes : (a) Niveau moyen de fatigue des bras par régularité et période de temps, (b) Distance moyenne entre la main et la cible par vitesse et (c) Précision moyenne par régularité, son et vitesse.

4.4 Résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats des mesures de performance et des questionnaires. Un test de normalité de Shapiro-Wilk [150] a montré que les données n'étaient pas normales pour les mesures de performance ($.39 < W < .93$ et $p < .0001$), par conséquent, nous avons utilisé le test ARTool [90, 176] pour effectuer une ANOVA sur des données non paramétriques, suivi d'un post-hoc ART-Contrast pour les principaux effets ou interactions statistiquement significatifs. De plus, comme les réponses aux questionnaires correspondent à des données ordinales, la même méthode ARTool a été appliquée. Dans ce qui suit, nous rapportons les résultats statistiquement significatifs.

4.4.1 Performances de l'utilisateur

Nous avons mesuré les variables dépendantes suivantes : la *fatigue perçue du bras* (évolution de la fatigue sur l'échelle Borg CR10 pendant la tâche), la *distance à la cible* (distance entre la main et la cible) et la *précision* (rapport entre le temps passé dans la cible et hors de la cible). La figure 4.3 affiche les résultats pour toutes les conditions avec des différences statistiquement significatives.

Fatigue du bras pendant la tâche. Nos résultats montrent un effet significatif de la *régularité* ($F_{1,546} = 13.21, p < .0001$) et de la *période de temps* ($F_{4,546} = 181.34, p < .0001$) sur la fatigue. Des tests post-hoc ont montré que les tâches *régulières* étaient notées significativement plus fatigantes (*moyenne* = 2.93, *sd* = 2.40) que les tâches *irrégulières* (*moyenne* = 2.71, *sd* = 2.43) ($p = .0003$). Nous avons également constaté que la fatigue perçue augmentait significativement à chaque période de

temps ($p < .0001$ entre chaque périodes sauf entre les deux dernières où $p = .0005$). Pour la première période nous avons une *moyenne* = 1.07 et *sd* = 0.68 soit un niveau de fatigue “très faible” alors que pour la dernière période nous avons une *moyenne* = 4.84 et *sd* = 2.72 soit un niveau de fatigue “fort”.

Distance à la cible. Nos résultats montrent également un effet significatif de la *vitesse* ($F_{1,546} = 94.52, p < .0001$) sur la distance entre la main et la cible. Des tests post-hoc ont révélé qu’avoir une *vitesse rapide* augmentait considérablement la distance entre la main et la cible (*moyenne* = 13.72m, *sd* = 3.78m) par rapport à l’utilisation d’une *vitesse plus lente* (*moyenne* = 11.88m, *sd* = 2.73m) ($p < .0001$).

Précision. Cette fois-ci, nos résultats montrent des effets principaux de la *régularité* ($F_{1,546} = 7.49, p = .0064$) et de la *vitesse* ($F_{1,546} = 45.91, p < .0001$) sur la précision avec les interactions : *régularité* × *vitesse* ($F_{1,546} = 4.66, p = .0313$), *vitesse* × *son* ($F_{1,546} = 4.29, p = .0388$) et *régularité* × *vitesse* × *son* ($F_{1,546} = 8.15, p = .0045$). Des tests post-hoc ont révélé que lors de l’utilisation de la condition *régulière* alors que le *son* est *inactif* ou de la condition *irrégulière* avec un *son actif*, la *vitesse rapide* faisait perdre nettement en précision par rapport à la *vitesse lente* ($p < .05$). Nous avons donc pour la condition *régulière-inactif-rapide* (*moyenne* = 96.62%, *sd* = 4.00%), pour la condition *régulière-inactif-lent* (*moyenne* = 98.62%, *sd* = 1.70%), pour la condition *irrégulière-actif-rapide* (*moyenne* = 92.26%, *sd* = 17.01%) et pour la condition *irrégulière-actif-lent* (*moyenne* = 98.17%, *sd* = 3.13%). Cependant, la précision est restée élevée dans tous les cas (*min* = 92.26%, *max* = 98.62%).

4.4.2 Questionnaire

La figure 4.4 illustre les résultats pour les questions dans toutes les conditions avec des différences statistiquement significatives.

Fatigue post-tâche. Nos résultats montrent des effets significatifs de la *vitesse* ($F_{1,98} = 12.91, p = .0005$) et du *son* ($F_{1,98} = 5.96, p = .0165$) sur la fatigue. Des tests post-hoc ont révélé que la *vitesse rapide* (*moyenne* = 4.52 et *sd* = 2.43) et le *son actif* (*moyenne* = 4.33 et *sd* = 2.26) impliquaient beaucoup plus de fatigue perçue que respectivement la *vitesse rapide* (*moyenne* = 3.79 et *sd* = 2.63) ($p = .0005$) et le *son inactif* (*moyenne* = 3.98 et *sd* = 2.81) ($p = .0165$).

Présence. Nos résultats montrent un effet significatif du *son* ($F_{1,98} = 7.30, p = .0081$) sur la sensation de présence. Des tests post-hoc ont révélé que lorsque le

4.4. RÉSULTATS

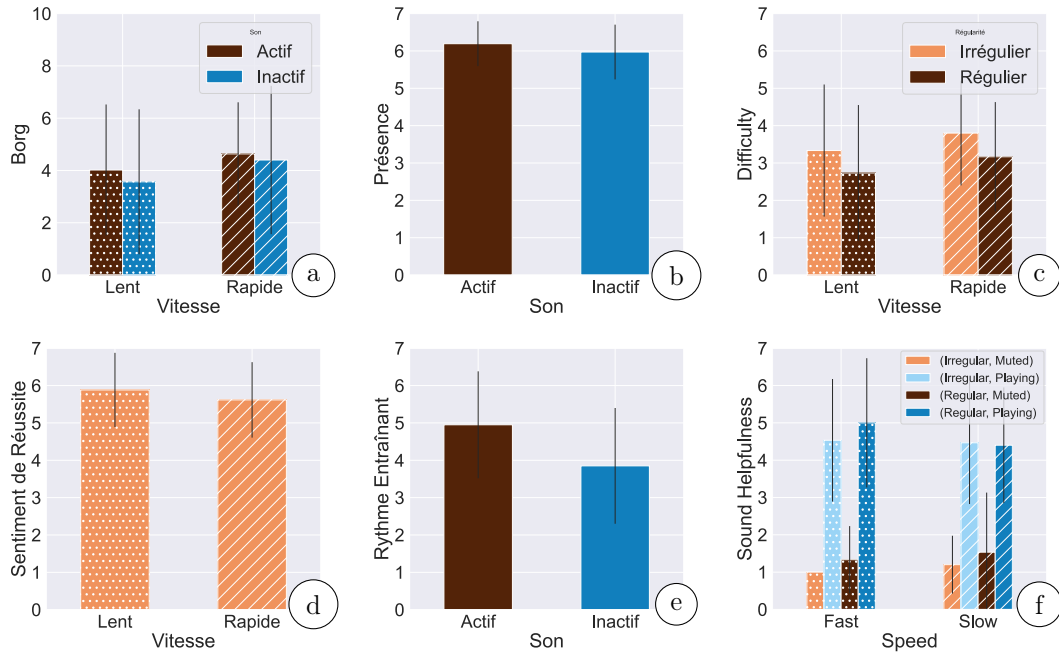


FIG. 4.4 – Résultats pour chacune des mesures dépendantes : (a) Niveau moyen de fatigue du bras à la fin des tâches par son et vitesse, (b) Moyenne du sentiment de présence par son, (c) Moyenne de la difficulté perçue par régularité et vitesse, (d) Moyenne du sentiment de réussite par vitesse, (e) Moyenne de l'impression d'un rythme entraînant par son et (f) Moyenne du sentiment d'utilité du son par régularité, vitesse et son.

son est *actif* ($moyenne = 6.19$ et $sd = 0.60$), le participant a un sentiment de présence significativement plus grand que lorsqu'il est *inactif* ($moyenne = 5.97$ et $sd = 0.73$) ($p = .0081$).

Difficulté. Nos résultats montrent des effets significatifs de la *régularité* ($F_{1,98} = 11.93$, $p = .0008$) et de la *vitesse* ($F_{1,98} = 6.05$, $p = .0157$) sur la difficulté. Des tests post-hoc ont révélé que les conditions *irrégulières* ($moyenne = 3.57$ et $sd = 1.60$) étaient notées beaucoup plus difficiles que les conditions *régulières* ($moyenne = 2.95$ et $sd = 1.65$) ($p = .0008$). De plus, la *vitesse rapide* ($moyenne = 3.48$ et $sd = 1.46$) a été notée, nettement plus difficile que la *vitesse lente* ($moyenne = 3.03$ et $sd = 1.80$) ($p = .0157$).

Sentiment de réussite. Nos résultats montrent un effet significatif de la *vitesse* ($F_{1,98} = 4.96$, $p = .0282$) sur le sentiment de réussite. Des tests post-hoc ont montré qu'une *vitesse lente* ($moyenne = 5.88$ et $sd = 0.99$) augmentait significativement

le sentiment de réussite par rapport à celle *rapide* ($moyenne = 5.62$ et $sd = 1.01$) ($p = .0282$).

Rythme entraînant. Nos résultats montrent un effet significatif du *son* ($F_{1,98} = 30.72$, $p < .0001$) sur la sensation que le rythme est entraînant. Des tests post-hoc ont révélé qu'un *son actif* ($moyenne = 4.95$ et $sd = 1.43$) aidait les participants à ressentir le rythme et le rendait plus entraînant que lorsque le *son* est *inactif* ($moyenne = 3.85$ et $sd = 1.55$) ($p < .0001$).

Utilité du son. Nos résultats montrent un effet significatif du *son* ($F_{1,98} = 221.76$, $p < .0001$) sur la perception de l'utilité du son. Nous avons également les interactions : *régularité* × *son* ($F_{1,98} = 7.09$, $p = .0091$) et *son* × *vitesse* ($F_{1,98} = 4.48$, $p = .0369$). Des tests post-hoc ont révélé que pour les conditions *régulière* et *irrégulière*, le *son actif* (respectivement: $moyenne = 4.70$, $sd = 1.64$ et $moyenne = 4.50$, $sd = 1.61$) était perçu comme aidant à suivre la cible par rapport au *son inactif* (respectivement: $moyenne = 1.43$, $sd = 1.28$ et $moyenne = 1.10$, $sd = .54$) ($p < .0001$). Nous avons également constaté que pour les *vitesse* *lente* et *rapide*, le *son actif* (respectivement: $moyenne = 4.43$, $sd = 1.57$ et $moyenne = 4.77$, $sd = 1.68$) était perçu comme aidant à suivre la cible par rapport au *son inactif* (respectivement: $moyenne = 1.37$, $sd = 1.25$ et $moyenne = 1.17$, $sd = .65$) ($p < .0001$). On observe donc que les interactions ne sont pas suffisamment significative puisque finalement quelque soit la *régularité* ou la *vitesse*, le *son*, lorsqu'il est *actif*, semble toujours aider le participant à garder le rythme.

4.4.3 Discussion sur les Résultats de l'Expérimentation

Effet du son. En termes de fatigue perçue, nos résultats indiquent que le *son* n'a pas d'impact pendant la tâche. Cependant et contrairement aux travaux antérieurs [160, 174], après la tâche, nous avons constaté une augmentation de la fatigue perçue lorsque le *son* était activé. Ces résultats pourraient s'expliquer par un plus grand sentiment de présence et sensation que le rythme est entraînant avec le *son actif*. Cependant, un seul participant l'a explicitement confirmé, le P34 : "Le son rend l'activité plus entraînante, on se laisse à mettre plus d'intensité dans nos gestes que lorsqu'il n'y a pas de son et cela demande donc plus d'effort pour chaque changement de direction ce qui au final rend l'exercice plus fatigant bien que plus intéressant." Cinq autres participants (P26-42-44-46-48) ont constaté qu'ils étaient plus concentrés sur la fatigue de leurs bras lorsque le *son* était *inactif* et qu'ils se sentaient donc plus fatigués. De plus, même si un *son actif* est perçu comme utile pour suivre la cible, il ne semble pas avoir d'impact sur la perception du succès ou de la diffi-

4.5. CONCLUSION

culté des tâches. Ces résultats semblent contredire les recherches précédentes dans lesquelles la musique a contribué à augmenter l'endurance [174]. Cependant, nous avons utilisé des sons de base qui ne servaient qu'à mettre en évidence le déplacement de la cible et pourraient donc renforcer la perception de l'effort, par rapport à une musique plus complexe qui pourrait plutôt "masquer" l'effort.

Effet de la *vitesse*. En termes de fatigue perçue, comme pour le *son*, les participants ont ressenti un impact de la *vitesse* seulement après la tâche mais sans surprise une *vitesse rapide* impliquait plus de fatigue qu'une *lente*. Cependant, lors des entretiens, au moins cinq participants (P8-14-22-34-46) ont estimé que la *vitesse lente* était plus fatigante que la *rapide* car l'exercice était moins "amusant". La *vitesse rapide* a également eu un impact négatif sur la distance entre la main et la cible et sur la précision (même si elle est restée élevée). De la même manière, la *vitesse rapide* augmentait la perception de la difficulté et diminuait le sentiment de réussite. En d'autres termes, la *vitesse rapide* a eu un impact négatif sur les performances des utilisateurs et sur la fatigue de leurs bras.

Effet de la *régularité*. En termes de fatigue perçue, contrairement à la *vitesse* et au *son*, nous avons trouvé que la *régularité* a un impact pendant la tâche mais pas après avec la condition *irrégulière* qui est perçue moins fatigante que celle *régulière*. Cette différence en termes de fatigue pourrait s'expliquer par la *vitesse* moyenne plus lente induite par notre façon de générer l'irrégularité. Cependant, la condition *irrégulière* semblait également augmenter la difficulté perçue, ce qui ne serait pas le cas si la différence de *régularité* n'était qu'une différence de *vitesse*. De plus, trois participants (P8-10-26) ont suggéré que la condition *irrégulière* était plus amusante et plus engageante et donc qu'ils étaient moins concentrés sur la fatigue et plus sur l'action.

4.5 Conclusion

À travers une expérience, nous avons exploré comment le rythme imposé à des gestes mid-air a un impact sur l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Nos résultats suggèrent que, si notre objectif est de réduire la fatigue, l'utilisation de gestes *irréguliers* et *lents* sans un *son* mettant en évidence le déplacement des cibles pourrait être un choix intéressant. Cependant, nos résultats suggèrent également que l'absence de *son* réduit le sentiment de présence et réduit l'impression que le rythme imposé est entraînant ce qui aussi le rend plus difficile à suivre. Notre expérience souffre cependant de certaines limites qui pourraient être levées dans les études futures. Un premier biais peut provenir du manque de parité des sexes des participants

et des conditions dans lesquelles ils ont fait l'expérience, *i.e.*, à distance dans des conditions moins contrôlées. Comme indiqué précédemment, nous avons observé des différences avec des travaux antérieurs sur l'effet du son sur la fatigue perçue. Les travaux futurs devraient étudier le rôle de la complexité du son/de la musique et de l'effet d'avoir un son soulignant la trajectoire souhaitée ou le geste de l'utilisateur. Pour ce faire il pourrait être intéressant de se pencher sur les travaux de Nutall et al. [126] qui proposent une solution pour générer, via un réseau de neurones, un rythme qui s'approcherait du jeu d'un humain sur différents styles et qui correspondrait à l'évolution du rythme sur de longues périodes de temps. Peut-être que ce genre de rythme serait plus attrayant pour les utilisateurs que les rythmes simples que nous avons utilisés et pourrait faire diminuer leur fatigue. Bien que nos résultats suggèrent un effet important de la *vitesse* et de la *régularité* sur l'expérience utilisateur, les variations de ces paramètres devraient être étudiées, telles que des vitesses plus lentes et plus rapides ou divers motifs pour les rythmes irréguliers. Nous pensons que nos résultats sont applicables au-delà de la RV, dans les interactions mid-air où la temporalité des gestes est maîtrisée ou lorsqu'une utilisation à long terme est fréquente, comme les jeux ou les applications créatives. En particulier, les exercices de rééducation nécessitent des séries de mouvements répétitifs dont le rythme pourrait être ajusté pour contrôler la fatigue.

4.5. CONCLUSION

Chapitre 5

Étude de l'Impact du CDR lors d'une Interaction avec un IVMI sur l'Expérience Utilisateur au Regard de la Fatigue Perçue des Bras

5.1 Introduction

Après avoir exploré les variations de la fatigue musculaire pour des interactions uni/bi-manuelles comparables à des exercices de rééducation et des interactions rythmiques comparables à des jeux de rythme, nous allons nous intéresser à la modification du rapport contrôle-affichage (control-display ratio ou CDR) lors de l'interaction avec un instrument de musique virtuel immersif (IVMI) [24, 149].

Les IVMI sont des instruments de musique numérique (Digital Musical Instrument ou DMI) qui prennent place dans un environnement virtuel en passant par exemple par un système de RV. Ce type d'instrument permet de supprimer certaines des contraintes physiques de la conception d'interfaces musicales telles que le poids et la taille d'un instrument. En particulier, ils permettent de placer librement divers contrôleurs autour du musicien [170]. Ces contrôleurs peuvent également être activés par différents gestes, qui peuvent aller de petits mouvements subtils à de grands mouvements amplifiés avec le même résultat musical. La plupart du temps, ces gestes d'interaction imitent les mouvements utilisés pour les instruments physiques [22].

Alors que dans le monde réel, non numérique, les musiciens doivent exprimer leur expertise sur un instrument qui offre une flexibilité limitée sur son facteur de forme, de nombreux paramètres peuvent être modifiés sur les IVMI, conduisant à de nou-

velles opportunités d'appropriation [180]. Plus précisément, les choix de conception peuvent avoir un impact sur divers composants de l'expérience de l'utilisateur avec l'instrument, tels que la fatigue [76], la difficulté [55], l'engagement et l'expressivité musicale [102, 113], la résolution des commandes musicales [23] ou la transparence pour le public [26, 52]. Le choix des gestes, de leur amplitude et de la composition de l'interface doit donc être soigneusement étudié.

Au-delà d'augmenter potentiellement la diversité des gestes, l'immersion visuelle permet également de contrôler la façon dont les gestes physiques sont perçus visuellement dans l'environnement virtuel. Cela permet des illusions telles que la marche redirigée [125], la manipulation redirigée [15] ou les illusions visio-haptiques [6, 51]. Généralement, ces illusions impliquent des changements dans le CDR. Pour un CDR supérieur à 1, les gestes (contrôle) sont amplifiés par rapport au retour visuel (affichage) tandis que pour un CDR inférieur à 1, les gestes sont réduits. Ils peuvent être appliqués à la rotation de la tête dans le cas d'une marche redirigée ou aux positions des mains et des doigts pour une manipulation redirigée. Ces redirections peuvent être utilisées pour améliorer le retour d'expérience des utilisateurs et donc leur sentiment de présence, pour élargir les possibilités d'interaction qui pourraient autrement être contraintes par des limitations physiques, etc. Nous pensons que des changements dans le rapport contrôle-affichage pourraient également être utilisés dans le cadre de l'interaction musicale pour enrichir l'expérience utilisateur.

5.2 État de l'Art

Dans cette section, nous passons en revue les travaux antérieurs qui étudient le rapport contrôle-affichage, l'amplitude des gestes musicaux et les instruments de musique virtuels immersifs.

5.2.1 Control-Display Ratio (CDR)

CDG / CDR / Remappage

Le gain contrôle-affichage ou rapport contrôle-affichage ou remappage a été un sujet de recherche important dès les premiers travaux sur l'interaction humain-machine. Comme expliqué précédemment, pour un CDR supérieur à 1, les gestes (contrôle) sont amplifiés par rapport au retour visuel (affichage) tandis que pour un CDR inférieur à 1, les gestes sont réduits. Dans les interfaces 2D, les gains dynamiques définissent la relation entre le mouvement de l'utilisateur et le mouvement du curseur, en utilisant une fonction définie sur la vitesse de déplacement de l'uti-

lisateur. Le déplacement de notre souris d'ordinateur est un des exemples le plus répandu de l'utilisation du CDR, effectivement le déplacement du curseur sur notre écran est généralement plus rapide/ample que les mouvements que nous effectuons avec notre souris. Il est prouvé qu'en adaptant la vitesse du pointeur en fonction de la vitesse du geste, il est possible d'améliorer les performances dans les tâches de sélection 2D [37]. Les techniques de sélection 3D reposent également sur le même principe pour augmenter l'efficacité lors de l'interaction dans des environnements virtuels. Certaines techniques adaptent le rapport contrôle-affichage en fonction de la position de la main, comme la technique Go-go [133], résultant en un remappage non-linéaire entre les mouvements des mains physiques et virtuelles.

Redirections / manipulations du CDR

Le rapport contrôle-affichage peut également être utilisé pour modifier la perception de l'utilisateur lors des interactions. Comme le montrent des études précédentes, les variations de CDR peuvent avoir un impact sur la perception de la masse d'un objet réel [51]. Cet objet sera perçu significativement plus léger si le CDR est inférieur à 1. D'autres recherches se sont concentrées sur l'utilisation du CDR pour limiter la zone d'interaction physique dans les techniques de marche réelle [125, 154] ou pour fournir un retour haptique à l'aide d'accessoires tangibles lors de la manipulation [15]. Steinicke et al. ont pu réduire la zone de marche physique de 14% par rapport à la zone virtuelle [154]. Azmandian et al. ont réussi à faire croire aux participants qu'ils manipulaient différents objets dans le monde virtuel alors qu'ils interagissaient avec un seul objet physique [15]. Les redirections visio-haptiques peuvent également être utilisées pour fournir un retour haptique sur des formes visuelles de différentes tailles avec un dispositif haptique de taille fixe [6].

Gestes, CDR et fatigue

Les recherches antérieures se sont principalement concentrées sur l'impact de la fatigue sur l'amplitude des gestes, montrant que l'amplitude des positions des coudes diminue lorsque la fatigue augmente [46], tout comme l'amplitude générale des mouvements [61]. Cependant, il y a tout de même certaines études qui ont étudié l'impact de l'amplitude du geste sur la fatigue. Hincapié Ramos et al. [76] ont constaté qu'un grand plan d'interaction produira plus de fatigue du bras qu'un petit. De la même manière, l'étude de l'impact du rapport contrôle-affichage sur la fatigue et l'expérience de jeu lors d'une séance de jeu de pêche [173] a montré que pour un geste réduit ($CDR = 0,1$) les participants percevaient moins de fatigue des bras, mais aussi moins de "flow" et de présence dans le jeu.

5.2.2 Musique

Amplitude des gestes musicaux

L'impact de l'amplitude gestuelle dans les DMI a été sérieusement étudié. Bin et al. [26] ont étudié l'influence de la taille des gestes sur l'expérience du public. Leurs résultats suggèrent qu'un instrument qui suscite des gestes plus larges est nettement plus intéressant et agréable pour les spectateurs. Jensenius et al. [84] ont exploré l'utilisation de micro-mouvements dans le contrôle des paramètres sonores. Ils montrent notamment que les micro-mouvements peuvent être correctement ressentis par l'interprète. Selon Mice & McPherson et al. [113], alors que les grands DMI entraînent un engagement accru du corps du musicien, leur influence exacte sur la performance nécessite une étude plus approfondie. Enfin, Gillian et al. [64] suggèrent que l'utilisation de grands gestes pour contrôler un VMI (Virtual Musical Instrument [120] *i.e.* instrument de musique virtuel) peut provoquer une fatigue du bras si le musicien a besoin d'atteindre des notes trop hautes ou trop éloignées et s'il n'a rien sur quoi reposer son bras pendant l'interaction. En somme, l'amplitude des gestes musicaux semblent avoir un important impact sur la performance musicale, que ce soit pour l'artiste ou le public. De plus, il semblerait que selon l'effet rechercher, toute la gamme d'amplitude de mouvements possible peut avoir son intérêt lors de l'interaction musicale.

Gestes dans des instruments immersifs

Un grand nombre d'IVMI ont été développés ces dernières années. Serafin et al. fournissent un examen complet de ces instruments [149]. Des recherches récentes ont montré l'intérêt de la réalité virtuelle pour la conception d'instruments dans lesquels des éléments de l'interface peuvent être placés librement autour du musicien, conduisant à diverses amplitudes gestuelles. Par exemple, Wakefield et al. [170] décrivent une implémentation RV d'un synthétiseur modulaire, insistant sur la facilité de réarranger les modules dans l'espace afin qu'ils soient confortablement à portée des musiciens. De plus, ces widgets 3D virtuels peuvent être modifiés pour changer leur comportement et les gestes qu'ils suscitent. Par exemple, Berthaut et al. [23] décrivent des curseurs virtuels appelés Tunnels qui modifient les paramètres graphiques des objets audiovisuels qui les traversent et à leur tour modifient les paramètres sonores associés. Ces widgets virtuels peuvent être étirés afin d'augmenter la résolution de contrôle, c'est-à-dire le nombre de valeurs de paramètres accessibles tout en déplaçant un objet à travers eux. Il en résulte des amplitudes visuelles et gestuelles plus importantes et une plus grande précision de contrôle.

Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été menée sur l'utilisation

du rapport contrôle-affichage dans les IVMI ou plus généralement sur son impact sur les DMI.

Musique, gestes et handicap

Les instruments de musique virtuels permettent également de proposer des concepts d'instruments plus inclusifs pour les personnes en situation de handicap que ce soit physique, par le positionnement, la taille, la forme ou les déformations, ou que ce soit cognitif en simplifiant les interactions et en réduisant la charge mentale [116]. Il est d'autant plus important de chercher à rendre la musique plus accessible pour les enfants en situation de handicap afin qu'ils puissent apprendre en même temps que les autres enfants et qu'ils puissent communiquer par la musique et développer leur sens artistique [159]. L'utilisation d'instruments de musiques adaptés aux handicaps pourrait aussi avoir des bienfaits thérapeutique sur les personnes lors d'exercices de rééducation [99].

Prendre en compte la fatigue lors de l'interaction pour rendre cette technologie plus inclusive semble aussi être un défis intéressant.

5.2.3 Contribution

Dans ce chapitre, nous étudions les changements dans le rapport contrôle-affichage dans le contexte des instruments de musique virtuels immersifs. Nous décrivons une expérience dans laquelle nous mesurons l'effet d'amplifier ou de réduire les gestes effectués lors de l'interaction avec deux tailles de contrôles virtuels, sur de multiples aspects de l'expérience utilisateur, à savoir la présence, la fatigue perçue du bras et l'expression musicale perçue. À partir des résultats, nous tirons un certain nombre d'idées et d'opportunités sur l'utilisation du CDR dans les IVMI.

5.3 Expérience

Nous avons mené une expérience pour évaluer l'effet du CDR sur la présence, la fatigue perçue du bras et l'expressivité musicale dans un IVMI. En particulier, nous cherchons à déterminer comment ces aspects seraient impactés par les variations entre les gestes perçus visuellement et les gestes exécutés physiquement.

Nous proposons une courte vidéo qui montre les différentes conditions couvertes par l'expérience que vous pouvez [voir ici](#).

5.3. EXPÉRIENCE

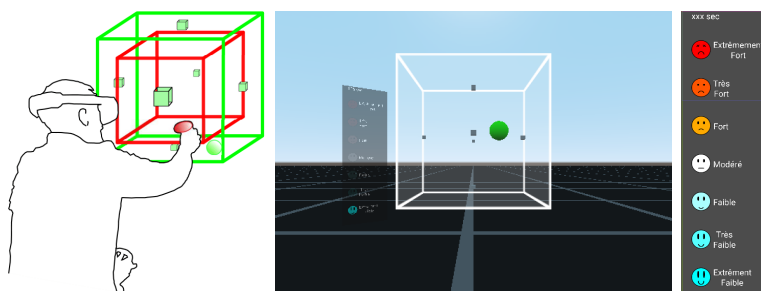


FIG. 5.1 – Montage expérimental. À gauche: participant assis avec un casque RV. Au centre: ce qu'ils ont vu, c'est-à-dire la fenêtre mobile de l'échelle Borg CR10 à gauche, le curseur sphérique au centre et la boîte visuelle avec les marqueurs. À droite: panneau d'échelle Borg qui est affiché dans la scène.

5.3.1 Participants

Vingt participants (19 hommes, 1 femme) se sont portés volontaires pour participer à notre expérience. Ils étaient âgés de 21 à 42 ans (*moyenne* = 27.5, *sd* = 5). Quatorze participants étaient droitiers et six gauchers. Quatre participants jouaient fréquemment d'un instrument de musique, dix en jouaient un à l'occasion, cinq avaient déjà joué d'un instrument au moins une fois et le dernier n'en avait jamais joué. Huit participants se sont définis comme des experts en réalité virtuelle, quatre participants utilisaient fréquemment la réalité virtuelle, quatre autres occasionnellement, deux avaient déjà expérimenté la réalité virtuelle au moins une fois et les deux derniers n'avaient jamais testé la réalité virtuelle. Les casques utilisés par les participants étaient : 6× Oculus Quest 2, 1× Oculus Quest 1, 2× Oculus Rift S, 7× Valve Index, 2× HTC Vive, 1× HTC Cosmos et 1× Samsung Windows Mixed Reality.

En raison de la pandémie COVID-19, une partie de cette expérience a été réalisée à distance avec treize participants qui possédaient un casque RV. Ils ont été recrutés via des listes de diffusion d'associations telles que l'[AFXR](#) et l'[AFIHM](#) et des forums. Ces participants ont téléchargé le logiciel d'expérimentation qui était une application développée sous le moteur de jeu vidéo Godot et compilée pour fonctionner à la fois sous SteamVR et l'Oculus Quest. Ensuite, les participants ont effectué la tâche lors d'une visioconférence avec l'un des auteurs. Les sept autres participants ont réalisé l'expérience dans notre laboratoire et ont utilisé la version SteamVR de l'application et le casque Valve Index comme nous pouvons le voir sur la Figure 5.1. Nous avons suivi toutes les précautions sanitaires nécessaires, en particulier le nettoyage du matériel avant et après utilisation. Les casques utilisés par les participants étaient: 6× Oculus Quest 2, 1× Oculus Quest 1, 2× Oculus Rift S, 2× HTC Vive, 1× HTC Cosmos, 1× Samsung Windows Mixed Reality, et 7× Valve Index dans le laboratoire. Tous les participants ont signé un accord de consentement éclairé.

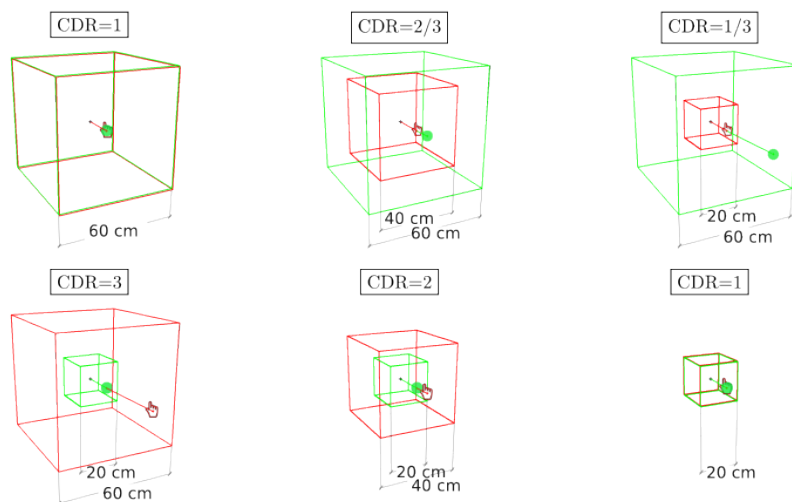


FIG. 5.2 – Tailles des boîtes visuelles et gestuelles : (rangée du haut) Grande boîte visuelle (60cm) avec les trois tailles gestuelles (a:60cm, b:40cm, c:20cm), (rangée du bas) Petite boîte visuelle (20cm) avec les trois tailles gestuelles (d:60cm, e:40cm, f:20cm).

5.3.2 Design

L'expérience a utilisé une conception intra-sujets 2×3 pour les facteurs : *régularité*, et *période de temps*.

La taille de la boîte visuelle est la taille de la boîte virtuelle perçue visuellement dans laquelle les interactions sont effectuées. Elle couvre deux conditions: visu-large ($60cm \times 60cm \times 60cm$) et visu-petit ($20cm \times 20cm \times 20cm$).

La taille de la boîte gestuelle correspond à l'amplitude des mouvements physiques requis pour déplacer le curseur à l'intérieur de la boîte visuelle. Elle couvre trois conditions: gest-large ($60cm \times 60cm \times 60cm$), gest-moyen ($40cm \times 40cm \times 40cm$) et gest-petit ($20cm \times 20cm \times 20cm$). Ces trois tailles ont été choisies pour être accessibles aux participants sans avoir besoin de bouger de leur chaise, c'est-à-dire en restant assis. Ils pouvaient utiliser le haut de leur corps pour accompagner le mouvement si nécessaire. Toutes les boîtes étaient centrées sur la même position, c'est-à-dire $x = 0cm, y = 120cm, z = -60cm$. Dans la Figure 5.2, nous montrons les différentes conditions pour les tailles de boîte visuelle et gestuelle.

5.3.3 Stimuli

Nous avons conçu un instrument de musique virtuel immersif sous la forme d'une table de mixage 3D. Il consiste en une boîte virtuelle qui contient 6 marqueurs (voir Figure 5.1). Chaque marqueur représente une piste audio. À l'intérieur de la boîte, l'utilisateur déplace un pointeur 3D virtuel. Les gains individuels des pistes sont associés ou "mappés" à l'inverse de la distance entre le pointeur et les marqueurs correspondants, avec une petite zone solo autour des marqueurs. Nous avons également mappé le gain principal sur la vitesse de déplacement du pointeur afin de forcer l'utilisateur à rester en mouvement.

Nous avons ensuite créé 7 préréglages musicaux, c'est-à-dire des ensembles de motifs musicaux, chacun composé des six pistes musicales suivantes: batterie, percussions, son de basse long, son de basse court, son mélodique long, son mélodique court. Afin d'éviter les biais, les préréglages ont été choisis pour être suffisamment similaires (même tempo de 110 bpm et mêmes pistes) mais suffisamment différents (motifs et sons différents), et ils ont été contrebalancés entre les participants et les conditions.

Le résultat est un mixer audio spatialisé où les utilisateurs doivent déplacer leur main en permanence pour maintenir le son et peuvent explorer différentes combinaisons de pistes à travers différentes trajectoires à l'intérieur de la boîte. Il oblige les utilisateurs à être en mouvement à tout moment et à essayer des gestes et des trajectoires à différentes positions dans l'espace et avec différentes amplitudes.

5.3.4 Procédure

Avant de démarrer l'application, les participants étaient invités à s'asseoir sur une chaise avec une zone dégagée devant eux afin d'éviter les collisions physiques. Nous leur avons demandé de s'assurer qu'ils n'avaient pas d'accoudoirs qui pourraient gêner leurs mouvements et nous leur avons dit de ne pas les utiliser pour se reposer pendant la tâche s'ils en avaient. Enfin, il leur a été demandé de calibrer le sol et le centre de leur casque pour qu'ils soient tous à peu près dans la même position par rapport aux zones d'interaction.

Après avoir répondu à un court questionnaire démographique, la tâche a été expliquée. Les participants commençaient alors l'expérience.

Nous avons procédé en deux phases: une phase d'entraînement suivie de la phase d'expérimentation. Dans les deux phases, les participants étaient invités à essayer de trouver autant de variations sonores que possible tout en gardant leur bras dominant en mouvement pour produire du son en continu. En parallèle, ils devaient utiliser leur

Label	Question
Post Fatigue	À quel point avez-vous trouvé cette tâche fatigante ? (Borg CR10)
Présence	Moyenne des résultats de la partie Adaptation/Immersion du questionnaire de Présence [147].
Complexité de sortie	Comment qualifieriez-vous la diversité des sons obtenus ?
Complexité d'entrée	À quel point avez-vous trouvé difficile le contrôle des sons ?
Liberté du joueur	Comment qualifieriez-vous la diversité des gestes que vous avez effectués ?
Expressivité	Comment qualifieriez-vous l'expressivité musicale du système ?
Agentivité	Jusqu'à quel point avez-vous eu l'impression d'être en contrôle du son ?

TAB. 5.1 – Questions utilisées pour évaluer l'expérience utilisateur. Pour la fatigue, nous avons utilisé le Borg CR10 [28] et pour les questions restantes, nous avons utilisé des questions sur une échelle de Likert en 7 points (de fortement en désaccord à fortement d'accord).

main non dominante pour renseigner la fatigue perçue du bras utilisé sur l'échelle de Borg. Cette échelle était affichée sur une fenêtre qui apparaissait toutes les 15 secondes devant le participant derrière le cube interactif. Les participants rapportaient leur perception de la fatigue du bras en utilisant le joystick sur le contrôleur de leur main non dominante (vers le haut pour augmenter et vers le bas pour diminuer). Ils ont également été informés que chaque essai durerait 3 minutes et qu'ils auraient une pause pour éviter l'accumulation de fatigue des bras. Après chaque essai, ils devaient remplir un questionnaire composé de la partie Adaptation / Immersion du questionnaire de présence [147] et de questions supplémentaires sur leur niveau final de fatigue et sur les composantes suivantes de l'expressivité musicale: agentivité (*i.e.* à quel point le participant se sent en contrôle du son), complexité d'entrée (*i.e.* difficulté à contrôler le son), complexité de sortie (*i.e.* diversité des sons obtenus), liberté du joueur [87] (*i.e.* diversité des gestes possibles) et expressivité générale (*i.e.* comment le participant perçoit l'expressivité du système). Le Tableau 5.1 fournit la liste des questions correspondantes. À la fin du questionnaire, nous avons demandé aux participants de se reposer le plus possible afin d'atteindre leur niveau de fatigue initial et d'éviter l'accumulation de fatigue entre les conditions. Nous avons également enregistré les positions des mains lors de chaque tâche, afin de récupérer la distance totale parcourue par la main. Enfin, nous avons également demandé aux participants de nous proposer un classement en terme de fatigue des différentes conditions qu'ils auront essayé. À chaque nouvelle condition, ils pouvaient changer

leurs réponses précédente tout en ajoutant la condition venant d'être jouée.

La phase d'entraînement a été conçue pour que les participants se familiarisent avec la tâche sans créer un effet d'apprentissage ou d'ordre. Par conséquent, tous les participants ont réalisé un premier essai avec une condition qui ne faisait pas partie de celles que nous voulions comparer. Plus précisément, dans cette phase, les dimensions des boîtes visuelles et gestuelles étaient de 40 cm × 40 cm × 40 cm. Cela a permis aux participants de comprendre la relation entre leurs mouvements et le son, et de s'habituer à rapporter leur niveau de fatigue sur l'échelle de Borg. Dans la phase d'expérimentation, les participants ont ensuite successivement exécuté la tâche dans les six conditions décrites ci-dessus pendant 3 minutes chacune. L'ordre des conditions a été contrebalancé entre les participants et les pré réglages sonores entre les participants et les conditions, afin d'éviter un effet d'ordre sur la fatigue ou l'engagement.

5.3.5 Hypothèses

Nous avons formulé les hypothèses suivantes sur l'effet du CDR sur l'expérience utilisateur. Tout d'abord, nous avons pensé que combiner une petite boîte gestuelle et une grande boîte visuelle produirait plus de fatigue mais que cela pouvait aussi être ressenti comme plus expressif. Deuxièmement, nous avons émis l'hypothèse que lors de la combinaison d'une grande boîte gestuelle avec une petite boîte visuelle, d'une part, l'interaction pouvait être vraiment frustrante en raison de l'impact réduit des gestes sur le curseur mais, d'autre part, cette condition pourrait augmenter la perception précision du contrôle du son.

5.4 Résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats des questionnaires, des enregistrements d'interaction, des classements et des entretiens.

5.4.1 Questionnaire

Étant donné que les réponses au questionnaire correspondent à des données ordinales, nous avons utilisé le test ARTool [176] pour effectuer une ANOVA sur des données non paramétriques, suivi de tests post-hoc de Wilcoxon signés pour les principaux effets ou interactions statistiquement significatifs. Un test de normalité Shapiro-Wilk montre que les données pour la distance parcourue totale de la main ne

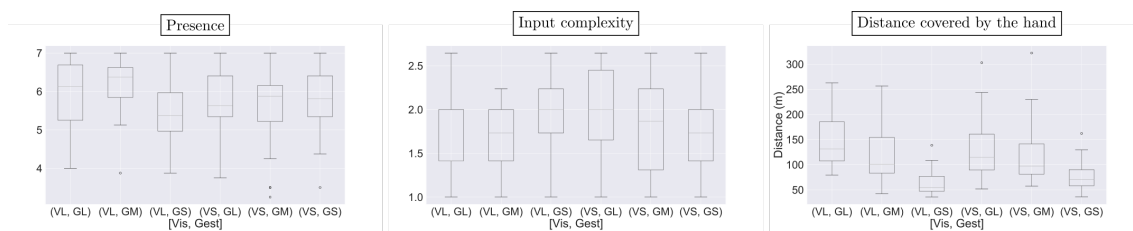


FIG. 5.3 – Distribution de la présence, de l'entrée et de la distance parcourue par la main pour chaque condition de taille de boîte visuelle \times taille de boîte gestuelle. Les boîtes à moustaches donnent la plage médiane et inter-quartile.

sont pas non plus normales ($W = .86, p = 3.41e^{-35}$), donc la même méthode ARTool a été appliquée. La figure 5.3 montre les mesures obtenues de toutes les conditions pour les questions présentant des différences statistiquement significatives.

Nous n'avons pas trouvé de différences statistiquement significatives pour les questions (voir la liste dans le Tableau 5.1) : post-fatigue, agentivité, complexité de sortie, liberté, expressivité.

Présence. Pour le score de présence, les résultats n'ont montré aucun effet principal significatif de la *taille de la boîte gestuelle* ou de la *taille de la boîte visuelle* ($p > .05$) mais ils montraient une interaction statistiquement significative : *taille de la boîte gestuelle \times taille de la boîte visuelle* ($F_{2,95} = 5.042118, p = .0083$). Des tests post-hoc ont montré que pour un *visu-large*, un *gest-moyen* (médiane = 6.375, $sd = .75$) implique une sensation de présence nettement plus importante qu'un *gest-petit* (médiane = 5.375, $sd = .86$) ($W = 172, p = .002$). Nous avons également constaté que pour un *gest-moyen*, un *visu-large* (médiane = 6.375, $sd = .75$) implique significativement plus de sentiment de présence qu'un *visu-petit* (médiane = 5.875, $sd = 1.12$) ($W = 155, p = .016$).

Complexité d'entrée. Pour le score de complexité d'entrée, les résultats n'ont montré aucun effet principal significatif de la *taille de la boîte gestuelle* ou de la *taille de la boîte visuelle* ($p > .05$) mais ils montraient une interaction significative : *taille de la boîte gestuelle \times taille de la boîte visuelle* ($F_{2,95} = 4.496, p = .013$). Des tests post-hoc ont révélé que pour un *visu-large*, avec un *gest-petit* (médiane = 2.00, $sd = .41$) la complexité d'entrée est perçue significativement plus élevée qu'avec un *gest-large* (médiane = 1.41, $sd = .46$) et un *gest-moyen* (médiane = 1.73, $sd = .36$) ($p < .05$). Nous avons également constaté que pour un *gest-large*, un *visu-petit* (médiane = 2.00, $sd = .53$) implique significativement plus de complexité d'entrée perçue qu'un *visu-large* ($p = .026$).

5.4.2 Distance Parcourue et Corrélation

Dans cette section, nous complétons les résultats des participants sur le questionnaire par une analyse quantitative de la distance parcourue par la main et de sa corrélation avec la fatigue perçue.

Distance parcourue. Nos résultats montrent des effets significatifs de la *taille de la boîte gestuelle* ($F_{2,95} = 158.84, p < .0001$) et de la *taille de la boîte visuelle* ($F_{1,95} = .625, p < .0001$) et une interaction significative: *taille de la boîte gestuelle* \times *taille de la boîte visuelle* ($F_{2,95} = 4.992, p < .0001$). Il est intéressant de noter que les tests post-hoc ont révélé que pour un *gest-large*, un *visu-large* (médiane = 131.37m, $sd = 54.58m$) produisait une distance significativement plus longue qu'un *visu-petit* (médiane = 115.03m, $sd = 61.04m$) ($p < .0001$). Inversement, pour un *gest-petit*, un *visu-large* (médiane = 54.55m, $sd = 26.99m$) a produit une distance significativement plus courte qu'un *visu-petit* (médiane = 70.72m, $sd = 31.26m$) ($p < .0001$).

Corrélation entre distance et fatigue. Dans l'ensemble, nous avons trouvé une corrélation modérée entre la fatigue perçue et la distance parcourue, confirmée par un test de Spearman ($r = .468, p < .01$). Nous exécutons ensuite des tests de score z de Fischer [77] pour comparer les différentes conditions. Nous avons constaté que, pour un *visu-petit*, un *gest-petit* ($r = .587, p < .0001$) a un coefficient de corrélation significativement plus élevé que les deux *gest-moyen* ($r = .480, p < .0001, zscore = 50.219$) et *gest-large* ($corr = .442, p < .0001, zscore = 66.206$). En revanche, pour un *visu-large*, nous avons constaté qu'un *gest-large* ($r = .544, p < .0001$) a un coefficient de corrélation significativement plus élevé que les deux *gest-petit* ($r = .506, p < .0001, zscore = 17.735$) et *gest-moyen* ($r = .490, p < .0001, zscore = 24.684$). Ces résultats suggèrent que les changements de CDR affectent la relation entre la distance et la fatigue perçue. Il se pourrait que sur des périodes plus longues que celles que nous avons testées, les variations du CDR réduisent potentiellement l'augmentation de la fatigue.

5.4.3 Classement

En ce qui concerne le classement donné par les participants sur le niveau de fatigue généré par toutes les conditions, une analyse des tableaux de contingence bayésiens a été réalisée à l'aide de JASP. Il a révélé un Facteur de Bayes de $BF10 = .071$, ce qui donne une preuve solide en faveur de l'hypothèse nulle. Cela suggère que les conditions et la fatigue perçue classées sont indépendantes, par conséquent, les

participants n'ont pas ressenti de changements dans la fatigue lors de la variation de la taille gestuelle et visuelle.

5.4.4 Entretiens et Observations

Nous fournissons ici les résultats des entretiens des participants et de leur observation pendant les tâches, concernant la fatigue perçue, le CDR et les mouvements.

Stratégies pour réduire la fatigue. Les participants ont eu recours à un certain nombre de stratégies pour réduire la fatigue pendant les tâches. En *gest-large*, cinq participants ont souligné le fait qu'ils pouvaient reposer leur bras plus près de leur corps alors qu'avec *gest-petit*, il devait toujours le garder en l'air. Mais l'un d'eux a également expliqué que cette stratégie limitait leur gamme de mouvements. Dans les autres conditions, trois participants ont suggéré que rapprocher leur buste de la zone d'interaction permettait à leur bras de se rapprocher du corps. Huit participants avaient tendance à garder le curseur au bas du cube lorsqu'ils se sentaient fatigués ou expliquaient que rester dans cette partie du cube était moins fatigant. Deux participants ont suggéré de changer l'orientation de leurs bras ou leur posture globale pour modifier les muscles impliqués dans les mouvements et limiter à leur tour l'augmentation de la fatigue des bras.

Commentaires sur CDR. Le changement de CDR n'a pas été immédiatement détecté par la plupart de nos participants, c'est-à-dire qu'ils n'ont remarqué le changement qu'après une ou deux conditions. De plus, un participant ne l'a remarqué que dans la dernière condition et un seul participant l'a remarqué lors de la première condition. Aussi, au moins cinq participants n'ont pas remarqué le CDR pour *gest-moyen*. Cela pourrait suggérer que les participants pourraient ne pas remarquer un CDR amplifié ou réduit s'il reste le même pendant l'utilisation ou si les changements dans le CDR restent suffisamment faibles.

Quelques participants ont été surpris en *visu-large + gest-petit* par le décalage entre la position de la main et la position du curseur lors du démarrage de cette condition. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lorsque leur main était trop éloignée du centre du cube, le curseur était alors hors de leur champ de vision. Nous pensons que ce problème pourrait être résolu par l'utilisation de changements locaux du CDR, par exemple uniquement à l'intérieur de la zone virtuelle de contrôle. Enfin, un participant a déclaré qu'il percevait le CDR comme une sensation de lourdeur ou de légèreté lorsque le CDR était respectivement réduit ou amplifié.

Commentaires sur le contrôle du son. Pour la condition *visu-large + gest-large*, cinq participants se sont plus senti en contrôle du son que pour les autres conditions et l'un d'eux a ajouté que cette condition rendait l'instrument plus expressif. Un seul participant a signalé plus de difficultés à contrôler le son en raison de la taille des gestes. Pour les conditions *visu-large + gest-petit*, *visu-petit + gest-large* et *visu-petit + gest-medium*, trois participants se sentaient moins en contrôle des sons que pour les autres conditions. Pour la condition *visu-large + gest-moyen*, un participant a déclaré qu'il "ressentait moins de perte de contrôle que prévu en raison de l'amplification visuelle des gestes". Le même participant a également constaté qu'il avait un bon contrôle sur le son pour la condition *visu-petit + gest-petit*. Enfin, nous avons relevé que cinq de nos participants auraient apprécié pouvoir utiliser leur deuxième main pour avoir plus de contrôle sur le son.

Observation des mouvements. Au cours de la tâche, nous avons observé une tendance sur la gamme des mouvements que les participants ont effectués. Au début, les participants ont rarement exploré les coins des boîtes. Certains participants ont ensuite commencé à faire de nombreuses lignes droites entre deux marqueurs parce qu'ils aimaient le mélange des deux pistes associées. Enfin, la plupart des participants ont fini par effectuer de petits gestes circulaires pour jouer un son spécifique ou un mélange de sons aussi constamment que possible.

5.5 Discussion

Dans cette section, nous fournissons des informations et des directives dérivées de nos résultats. Sur cette base, nous décrivons une première proposition d'instrument de musique virtuel immersif redirigé localement.

5.5.1 Impact du CDR sur le Sentiment de Présence avec les IVMI

Nos résultats suggèrent qu'une réduction modérée des gestes ($CDR = 2/3$) augmente la sensation de présence par rapport à une amplification modérée ($CDR = 2$). De plus, ils suggèrent qu'une forte réduction des gestes ($CDR = 1/3$) diminue également le sentiment de présence par rapport à une réduction plus faible ($CDR = 2/3$).

Nous pensons donc que s'il est soigneusement choisi, un CDR qui réduit l'amplitude des gestes dans un IVMI par rapport à leur représentation visuelle, c'est-à-dire avec des gestes perçus plus grands qu'ils ne le sont réellement, peut conduire à un

sentiment plus fort d'adaptation / d'immersion pour l'utilisateur.

5.5.2 Impact du CDR sur la Difficulté du Contrôle du Son

Les résultats sur la complexité d'entrée, ou la difficulté à contrôler le son, suggèrent qu'elle augmente lorsque les gestes physiques sont fortement amplifiés par rapport au visuel ($CDR = 3$), par rapport à l'absence d'amplification ($CDR = 1$). Une forte réduction des gestes ($CDR = 1/3$) augmente également la complexité d'entrée par rapport à l'absence de réduction ($CDR = 1$) et à une petite réduction des gestes ($CDR = 2/3$).

Nous pensons donc que le CDR peut être utilisé comme alternative à l'étirement des contrôles virtuels [23] afin d'augmenter l'amplitude des gestes et par conséquent la résolution des contrôles musicaux tout en préservant la taille des widgets de contrôle. Cette modification doit cependant être limitée à de petits rapports afin d'éviter une augmentation de la difficulté de contrôle perçue par l'utilisateur.

5.5.3 Impact Potentiel du CDR sur la Fatigue des Utilisateurs

Bien que nos résultats ne suggèrent aucun impact direct du CDR sur la fatigue perçue du bras lors de l'interaction musicale, nous pensons que cela pourrait être dû à la courte durée des tâches que nous avons conçues, qui n'a pas entraîné une fatigue suffisante. Cette absence d'effet est également corroborée par l'indépendance entre le classement de fatigue et les conditions. Cependant, nous pouvons observer un effet sur la distance totale parcourue par la main. En particulier, lorsque les gestes sont fortement amplifiés ou réduits ($CDR = 3$, $CDR = 1/3$), la distance totale parcourue est plus petite. Cet effet pourrait s'expliquer par une augmentation de la difficulté à contrôler le mouvement du curseur, comme le soulignent les entretiens des participants.

En outre, notre expérience confirme également les résultats d'études connexes sur la corrélation entre la distance parcourue par la main et la fatigue perçue du bras. Il semble que de fortes variations de la CDR dans les IVMI pourraient conduire sur des périodes plus longues à une diminution de la fatigue en raison de l'augmentation de la difficulté perçue de contrôle. Nous avons également observé une différence significative de corrélation entre les conditions, ce qui pourrait indiquer que les changements de CDR réduisent la corrélation entre la distance et la fatigue.

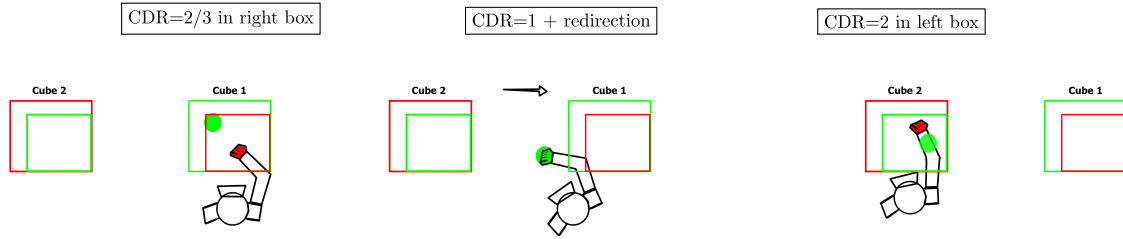


FIG. 5.4 – Exemple de séquence d’interaction au sein d’un environnement musical virtuel redirigé dans lequel deux zones d’interactions sont définies avec des CDR différents.

5.5.4 Vers un Environnement Musical Virtuel Redirigé

D’après les résultats de notre expérience, nous suggérons que de petits changements dans la CDR peuvent être utilisés pour amplifier ou réduire visuellement les gestes dans les IVMI. Une réduction de geste de par exemple $CDR = 2/3$ peut aider à augmenter la sensation de présence tout en préservant la facilité de contrôle de l’instrument, alors qu’une petite amplification ($CDR = 2$) peut augmenter la précision du contrôle (avec un geste plus large sur le même widget de contrôle 3D) sans effets importants sur la fatigue perçue, la présence et la complexité en entrée.

Cependant, nous proposons que ces redirections dans les gestes musicaux puissent être poussées plus loin, pour permettre une conception flexible des IVMI qui tire parti des manipulations du CDR. En particulier, l’un des avantages des IVMI est la possibilité offerte à l’utilisateur de placer librement plusieurs zones d’interaction selon ses préférences, ce qui se traduit par une meilleure appropriation des instruments [180].

Ce que nous envisageons est un environnement musical virtuel qui serait composé de zones avec des rapports Contrôle-Affichage définis localement. Les widgets 3D, tels que les boîtes de contrôle ou les curseurs 3D, pourraient amplifier les gestes, conduisant à une résolution de contrôle accrue, ou réduire les gestes, pour augmenter le sentiment de présence. En dehors de ces widgets, les mouvements de l’utilisateur pourraient être redirigés, suivant la technique proposée dans [15], afin de réduire l’espace d’interaction physique, en gardant les mains dans la même zone d’interaction.

La figure 5.4 montre un exemple de séquence d’interaction dans un tel environnement. Sur la figure la plus à gauche, l’utilisateur interagit dans un premier widget de contrôle en 3D qui réduit ses gestes par rapport à l’affichage visuel. Dans la figure du milieu, il déplace sa main pour interagir avec un deuxième widget à gauche. Cette transition est redirigée pour que la main soit progressivement ramenée à sa position d’origine. Il atteint alors le boîtier de commande gauche à l’intérieur duquel une

amplification des gestes a été définie, afin d'augmenter la précision de contrôle dans un espace visuel limité.

Bien que cette proposition ouvre de nouvelles opportunités pour l'expression musicale, elle crée également de nombreux nouveaux défis de conception, tels que : la façon de gérer la redirection pour une interaction bi-manuelle, comment intégrer la navigation dans un tel environnement, quels sont les seuils exacts pour réduire et augmenter visuellement les gestes sans perturber l'expérience de l'utilisateur, etc.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une expérience pour étudier comment le CDR pourrait avoir un impact sur l'expérience utilisateur avec un instrument de musique numérique (DMI). Cette expérience a montré qu'une variation modérée de CDR peut avoir un impact positif sur la présence et la difficulté de contrôle et indirectement qu'elle pourrait avoir un impact sur la fatigue en réduisant la distance parcourue par la main. En particulier, elle a montré que l'utilisation d'un CDR autour des 2/3 pouvait conduire à un gain de présence par rapport à un CDR de 1/3 et 2. Le même CDR pouvait également conduire à une diminution de la difficulté de contrôle par rapport à un CDR de 1/3.

Sachant cela, nous avons proposé une conception de DMI avec des zones d'interaction localement amplifiées ou réduites et un mécanisme de redirection pour les atteindre. Nous espérons que cela permettra de donner une large gamme de contrôles aux utilisateurs en choisissant s'ils veulent plus de précision, de présence ou moins de fatigue lors des interactions.

Notre expérience a souffert de certaines limites qui devraient être prises en compte pour des recherches ultérieures. En raison de l'attribution des identifiants des participants, les conditions n'étaient pas entièrement équilibrées entre les participants, certaines ne se produisant qu'à des positions paires et d'autres à des positions impaires. La conduite à distance de l'expérience a également mené certains participants à être dérangés pendant les tâches, par des bruits ou d'autres personnes dans leurs maisons, ce qui ne se serait pas produit dans un laboratoire. La variété des préréglages musicaux, choisis pour réduire un éventuel biais d'ennui, aurait pu conduire à un effet de préférence plus fort que souhaité entre les préréglages, ce qui aurait pu modifier les réponses. Enfin, bien que la tâche n'ait peut-être pas été assez longue pour provoquer de la fatigue, les pauses entre les tâches peuvent aussi avoir été trop courtes pour revenir à un niveau de fatigue suffisamment bas.

Parmi les travaux futurs, nous pensons que notre proposition pour un environnement musical virtuel redirigé a le plus de potentiel. Cela nécessite une étude plus

5.6. CONCLUSION

approfondie des techniques de redirection avancées et des seuils.

Chapitre 6

Conclusion

Dans cette thèse, nous avons étudié la fatigue des bras dans divers cas d'interaction en réalité virtuelle. Nous avons dans un premier temps défini le cadre de notre recherche se focalisant sur la fatigue produite par les gestes effectués pour interagir avec un environnement virtuel. Par la suite, nous avons exploré cette fatigue sous différents angles en commençant par évaluer les interactions à une ou deux mains, puis en étudiant l'impact qu'avait dessus le rythme des gestes et nous avons fini avec une expérience où nous avons testé les effets du changement du CDR lors de l'utilisation d'un instrument de musique virtuel immersif. Pour conclure ce mémoire, nous discuterons des liens existant entre les principaux résultats obtenus durant nos expériences et nous présenterons ce que nous en avons extrait, soit des conseils de conception pour des interfaces en RV moins fatigantes. Nous finirons par ouvrir sur de potentiels futurs travaux et sur les nouvelles questions que nous ont apporté ces recherches.

6.1 Discussion Générale

Nous commençons cette discussion en présentant un résultat qui est commun à chacune de nos expériences à savoir la corrélation entre la fatigue musculaire du bras et la distance cumulée parcourue par la main au cours de la tâche. Ce point ne nous a pas réellement étonnés, étant donné que logiquement, plus on active les muscles de son bras pour parcourir une longue distance, plus on fournit un effort important et plus on se fatigue. Malgré cela, ce résultat reste intéressant car il nous suggère que la distance parcourue par la main pourrait nous permettre à elle seule de fournir une approximation potentiellement grossière de la fatigue mais qui aurait le bénéfice d'être particulièrement simple à mettre en place quel que soit le système d'interaction gestuel (*i.e.* RV avec manettes, tactile sur grand écran, capture de

6.1. DISCUSSION GÉNÉRALE

mouvements via des caméras, etc.). Aussi, une telle mesure ne nécessitant qu'un seul point de suivi pour la main pourrait peut-être être un premier indicateur à mettre en place avant l'Endurance Consommée [76] ou la Fatigue Cumulée [81].

Une autre observation que nous avons pu faire, sur les trois études présentées, est que nos participants ont eu tendance à régulièrement changer leur posture. Nous avons d'ailleurs suggéré que ces changements pourraient être un indicateur de la fatigue. Effectivement, il semblerait que les utilisateurs essaient de varier les muscles impliqués dans leurs mouvements afin de mieux répartir l'effort. Ils peuvent donc moins se fatiguer le bras par exemple en utilisant les muscles dorsaux et abdominaux pour une rotation ou un balancement du buste qui accompagnent le mouvement et réduit l'amplitude d'extension du bras. C'est d'ailleurs, un résultat comparable à ce que montrent les études sur l'impact de la fatigue sur l'amplitude du mouvement [46, 61, 177, 178]. Une idée attrayante serait d'utiliser le CDR pour rediriger les mouvements des utilisateurs afin de forcer leur changements de posture et observer s'ils se fatiguent moins ainsi et à quel rythme ces variations de la posture devraient être amenées.

Ensuite, nous revenons sur les liens qui ont été faits à plusieurs reprises entre la difficulté d'effectuer une tâche et la fatigue qui en résulte. Dans plusieurs des cas étudiés, les conditions plus difficiles à effectuer étaient également notées comme moins fatigantes (*p.ex.* les conditions à deux mains pour le pointage simple, les conditions de rythme irrégulier pour le suivi de cible en rythme). La justification semblant la plus plausible pour expliquer ce phénomène serait que pour ces tâches perçues comme difficiles, les participants parcourent moins de distance : soit parce qu'ils diminuent d'eux même leur vitesse de déplacement des mains afin de conserver leur précision lors des tâches de pointage répétitives, soit parce que la vitesse imposée est légèrement réduite en moyenne pour les conditions de rythme irrégulier. Cependant, pour ce dernier point au moins, nous avons des participants qui ont suggéré que cette condition est plus amusante et entraînante et que, par conséquent, ils ont été plus focalisés sur l'objectif de réussir à suivre la cible que sur leur fatigue. Ce résultat est d'ailleurs renforcé par le fait que certains participants ont trouvé que les conditions de vitesse lente sont plus fatigantes, car moins prenantes que celles plus rapides. Aussi, nous avons relevé que la distance parcourue pour les conditions de fortes variations de CDR est significativement plus faible, car le contrôle du curseur est plus délicat et difficile à gérer, nous pensons que pour un exercice plus long, ces conditions auraient probablement pu produire moins de fatigue que les autres conditions de CDR puisque la différence de distance parcourue par les mains aurait potentiellement été encore plus importante.

Aussi, l'extension des bras lors de mouvements demandant à les lever et/ou les amener loin du corps, a à chaque fois été perçue comme particulièrement fatigante et difficile à effectuer. Ce résultat semble être parmi ce que nous avons trouvé de

plus proche avec la littérature dans le domaine [76, 105, 144] à savoir qu’il vaut mieux éviter les mouvements sur un plan vertical et favoriser les interactions basses et proches du corps.

Enfin, nous avons noté que dans notre expérience sur un IVMI le quart de nos participants ont spontanément suggéré qu’il pourrait être intéressant de proposer des interactions bimanuelles pour avoir plus de contrôles possibles sur les sons produits. Lors de la conception de telles interactions, il faudrait prendre en compte ce que nous avons trouvé lors de nos premières expériences portant sur les synchronisations des mains. Cependant, nos résultats ne seront pas forcément applicables tels quels dans le cas de l’utilisation d’un instrument de musique puisque l’engagement de l’utilisateur risque d’être fortement différent de celui qu’il avait lors de ces tâches de pointage répétitives. Or, précédemment nous avons suggéré que l’expérience de l’utilisateur dont la présence ressentie pourrait avoir un sur la perception de la fatigue musculaire. Nous trouverons donc peut-être qu’en laissant le participant libre de choisir ses stratégies d’interaction, il ne privilégiera pas forcément l’utilisation d’une seule main à la fois comme pour les tâches que nous avons proposées.

Par ailleurs, en terme de limitations, certaines étaient communes entre nos études :

- Le nombre de participants trop faible pour nous permettre de généraliser nos résultats. Cette pénurie de participants s’est vue encore renforcée avec la pandémie de COVID19 puisqu’il a fallu trouver des volontaires bénévoles possédant ou ayant accès à un casque de RV. Une réflexion plus poussée sur comment pouvoir recruter plus de participants semble s’imposer. Cependant, des solutions existantes comme la rémunération des participants pourraient mener à des biais les poussant à faire plus d’effort que s’ils étaient en conditions réelles d’utilisation et inversement dans le cas où aucune récompense ne serait proposée.
- Des sessions d’interaction éventuellement trop courtes par condition pour nous permettre de fatiguer assez les participants et d’observer de nettes distinctions entre conditions. Pour palier à ce problème, nous pensons qu’il faudrait concevoir des expériences avec moins de paramètres à tester afin de pouvoir laisser les participants plus longtemps sur chaque condition.
- Le passage des expériences à distance pour celles effectuées durant la période de COVID19 qui a pu perturber les participants par des éléments extérieurs non contrôlés. Cette limitation n’est pas forcément si problématique en elle-même puisque cela pourrait permettre de tester des applications dans des cas plus réels d’usage de la RV. Effectivement, que ce soit pour le jeu, la rééducation ou l’éducation, les conditions ne sont généralement pas celles d’un laboratoire. Ce type de test pourrait donc venir en complément pour étoffer les résultats comme le suggèrent Reyal et al. [137].

6.2 Conseils de Conception d'Interfaces de RV avec une Fatigue Plus Contrôlée

Dans cette section, nous présenterons les conseils de conception pour la production d'interactions en RV moins fatigantes (ou du moins conscientes de la fatigue induite). Nous suggérons ces conseils à la suite de la discussion précédente. Ensuite, nous reviendrons rapidement sur les conseils que nous avons déjà proposés dans les chapitres précédents et qui seraient potentiellement plus particuliers à certains cas d'usage.

En se basant sur l'objectif de concevoir des applications peu fatigantes, nous pouvons déjà suggérer de réfléchir les interactions de telle sorte qu'elles demandent le moins possible à l'utilisateur de lever ou étendre ses bras et qu'elles ne lui fassent pas non plus parcourir trop de chemin soit en proposant des zones d'interactions directes proches de la main utilisée soit en proposant des interactions indirectes à main basse comme proposé par Liu et al. [105] et Ruiz et Vogel [144].

Ensuite, développer des interactions difficiles mais stimulantes et amusantes pour l'utilisateur ne semblerait pas poser de problème pour la fatigue. Voir au contraire cette difficulté pourrait être bénéfique et diminuer la fatigue si une certaine vitesse d'exécution de la tâche n'est pas attendue. Il semblerait donc qu'il faille éviter d'imposer une vitesse d'exécution trop rapide, car elle amènerait l'utilisateur à avoir des difficultés à interagir, mais elle lui procurerait également un surplus de fatigue due à un déplacement excessif des bras. Ce choix de la difficulté pour diminuer la fatigue pourrait être étudié en parallèle des interactions expertes (voir Paragraphe 2.1.2) puisque dans ces dernières, nous choisissons une technique plus difficile à prendre en main mais qui nous apporte un gain de performance. Ici à la place d'un gain en performance nous aurions une économie d'effort physique.

Pour revenir sur les conseils que nous avons fournis dans les conclusions des chapitres précédant, nous proposons la liste suivante :

- Si la tâche à effectuer ne demande pas une synchronisation spécifique des mains, laisser aux utilisateurs la possibilité d'alterner autant qu'ils le veulent entre leurs mains.
- Si une tâche doit être allouée à une main, favoriser un placement permettant à la main d'interagir sans avoir à tendre le bras trop loin ou trop haut et en respectant la latéralité de la main.
- Les interactions bimanuelles sont particulièrement intéressantes lors d'interactions avec de multiples objets ou zones d'interaction, il ne faut donc pas systématiquement les éviter malgré que les utilisateurs semblent plus naturellement n'utiliser qu'une main à la fois.

- Préférer une interface demandant une interaction sur le plan horizontal à celles demandant des gestes sur l'axe vertical ou sur les axes diagonaux que nous avons étudiés.
- Proposer si possible des interactions plutôt lentes qui permettent à l'utilisateur de ne pas se fatiguer trop rapidement. Attention cependant à ne pas non plus demander des mouvements trop lents qui pousseraient l'utilisateur à avoir le bras trop longtemps dans une zone d'interaction fortement fatigante.
- Envisager des interactions suivant un rythme irrégulier pour potentiellement maintenir l'intérêt et l'attention de l'utilisateur et diminuer sa fatigue par la même occasion.
- Ne pas automatiquement ajouter de la musique/un son pour accompagner le rythme imposé au mouvement dans le cadre d'interaction rythmique puisqu'il se pourrait que le son ait parfois un impact négatif sur la fatigue.
- Restreindre les variations du CDR semble permettre de préserver le sentiment de présence des participants. Donc, dans le cas où nous souhaiterions utiliser des variations de CDR, il faudrait favoriser des valeurs comprises entre 1/3 et 3.

6.3 Travaux Futurs

Comme nous l'avons déjà évoqué dans nos précédentes conclusions, les travaux futurs envisageables sur la question de la fatigue en interaction mid-air et RV sont nombreux.

6.3.1 Estimateur

Proposer un estimateur de fatigue, même basique, pour une utilisation plus commune de la RV serait particulièrement intéressant, car cela permettrait d'informer les utilisateurs sur leur activité et nous pourrions leur proposer de se reposer régulièrement ou quand un certain niveau de fatigue serait atteint. Cet estimateur pourrait selon nos résultats se déduire de la distance parcourue par la main de l'utilisateur. Outre l'usage susmentionné, nous serions curieux d'expérimenter la conscience qu'a l'utilisateur de ce que représente la distance qu'il parcourt avec sa main. Nous pourrions pour cela explorer différentes conditions d'affichage, dans l'environnement virtuel, d'informations sur cette distance et sur l'estimation que l'on fait de sa fatigue des bras. Une telle expérience permettrait entre autres de valider ou invalider cette nouvelle métrique.

Une deuxième solution pour estimer la fatigue a également été soulevée et consiste

en l'observation des changements de postures de l'utilisateur. Pour pouvoir proposer un tel estimateur, nous pensons qu'il faudra explorer plus systématiquement le comportement postural des utilisateurs lors de l'interaction pour trouver une corrélation quantitative avec la fatigue des bras. Par ailleurs, des études explorant les liens entre la posture et la fatigue existent déjà [71, 157]. Cette piste semble donc plutôt prometteuse, toutefois, pour évaluer la posture numériquement, il faudra passer par des techniques de capture des mouvements comme pour la mesure de l'Endurance Consommée [76] ou de la Fatigue Cumulée [81]. Aussi toutes nos études portant sur des interactions gestuelles où le participant est assis, il est fort probable que les postures et leurs variations soient différents dans un contexte où l'utilisateur est debout.

6.3.2 CDR

Dans le chapitre sur l'expérience dans un IVMI où le CDR est modifié, nous avons proposé un concept d'instrument où les interactions seraient localement redirigées qu'il faudrait tester dans un premier temps (voir Section 5.5.4). Par la suite, une idée dérivée de cela serait d'utiliser le CDR pour rediriger les mouvements des utilisateurs afin de forcer leurs changements de posture et observer s'ils se fatiguent moins ainsi et à quel rythme ces variations de la posture devraient être amenées.

6.3.3 IVMI Bimanuel

Nous avons soulevé le fait, dans notre expérience sur l'IVMI, que certains participants ont exprimé l'envie de pouvoir interagir avec l'interface en utilisant deux mains. Cela permettrait de leur proposer d'avoir plus de paramètres sonores à contrôler ou même d'avoir deux cubes avec des sons différents pour plus de variété. L'intérêt de cette étude pourrait porter sur l'impact d'une application plus stimulante lors de l'interaction bimanuelle. Ou encore nous pourrions proposer un instrument contrôlable autant à une ou deux mains pour observer si les utilisateurs préfèrent cette fois l'utilisation de deux mains au lieu d'une seule comme dans nos expériences 2 et 4 (voir sections 3.6, 3.11).

6.3.4 Motifs Rythmiques et Complexité Musicale

Dans le chapitre portant sur l'évaluation de l'impact du rythme sur la fatigue (voir Section 4.5), nous avons proposé d'explorer plus en détails l'utilisation de rythmes à l'irrégularité contrôlée. C'est-à-dire qu'au lieu de proposer une variation

aléatoire de la vitesse comme nous l'avons fait, nous pourrions proposer des motifs irréguliers qui se répéteraient au cours du temps lors de l'interaction. Il s'agirait d'une condition d'*irrégularité régulière*. Peut-être que ce type de rythme permettrait à l'utilisateur de se sentir autant présent que lors de la condition irrégulière que nous avons proposée, mais que dans un même temps, la répétition d'un motif lui simplifierait la tâche. On peut alors se demander comment la fatigue de l'utilisateur réagirait. Serait-elle faible grâce à son état psychologique ou serait-elle plus forte du fait que la tâche serait plus simple?

Dans le même chapitre, la question de la complexité musicale s'était également posée. Les sons que nous avons joués dans cette expérience étaient très basiques et ils soulignaient le rythme que l'on voulait imposer aux participants. Nous nous demandons donc si proposer une musique plus mélodique et complexe peut améliorer les résultats de fatigue. Aussi est-ce qu'adapter la musique aux gestes du participant plutôt que de fournir un guide audio sur le rythme imposé peut changer cette fatigue?

6.4 Mots de la Fin

Bien que de nombreuses recherches seront encore nécessaires pour permettre de produire des applications qui pourront parfaitement comprendre et s'adapter à la fatigue des utilisateurs, nous avons contribué, à notre échelle, avec les travaux présentés dans cette thèse et nous avons proposé des pistes d'exploration qui, nous l'espérons, permettront de se rapprocher encore de cet objectif.

6.4. MOTS DE LA FIN

Bibliographie

- [1] Bienvenue à VIVEPORT.
- [2] Oculus meilleures ventes.
- [3] Réalité virtuelle sur Steam.
- [4] Tracking | Leap Motion Controller | Ultraleap.
- [5] Anthropometry & Biomechanics, 2020.
- [6] P. Abtahi and S. Follmer. Visuo-haptic illusions for improving the perceived performance of shape displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–13, 2018.
- [7] B. Ahlstrom, S. Lenman, and T. Marmolin. Overcoming touchscreen user fatigue by workplace design. In *Posters and Short Talks of the 1992 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '92*, pages 101–102, Monterey, California, May 1992. Association for Computing Machinery.
- [8] R. Aigner, D. Wigdor, H. Benko, M. Haller, D. Lindbauer, A. Ion, S. Zhao, and J. Koh. Understanding mid-air hand gestures: A study of human preferences in usage of gesture types for hci. *Microsoft Research TechReport MSR-TR-2012-111*, 2:30, 2012.
- [9] S. Al-Megren, A. Kharrufa, J. Hook, A. Holden, S. Sutton, and P. Olivier. Comparing fatigue when using large horizontal and vertical multi-touch interaction displays. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pages 156–164. Springer, 2015.
- [10] F. Argelaguet and C. Andujar. A survey of 3d object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37(3):121–136, 2013.
- [11] Y. M. Aung. Augmented Reality System for Rehabilitation: New Approach Based On Human Interaction and Biofeedback. page 241, 2016.
- [12] Y. M. Aung and A. Al-Jumaily. Development of augmented reality rehabilitation games integrated with biofeedback for upper limb. In *i-CREATE 2011-International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology*, 2011.
- [13] Y. M. Aung and A. Al-Jumaily. Augmented Reality based Illusion System with biofeedback. In *2nd Middle East Conference on Biomedical Engineering*, pages 265–268, Feb. 2014.

- [14] A. Ayoub and Y. Pulijala. The application of virtual reality and augmented reality in oral & maxillofacial surgery. *BMC Oral Health*, 19(1):1–8, 2019.
- [15] M. Azmandian, M. Hancock, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson. Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. In *Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems*, pages 1968–1979, 2016.
- [16] K. M. Bach, M. G. Jæger, M. B. Skov, and N. G. Thomassen. Interacting with in-vehicle systems: understanding, measuring, and evaluating attention. *People and Computers XXIII Celebrating People and Technology*, pages 453–462, 2009.
- [17] M. Bachynskyyi, A. Oulasvirta, G. Palmas, and T. Weinkauff. Is motion capture-based biomechanical simulation valid for HCI studies?: study and implications. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*, pages 3215–3224, Toronto, Ontario, Canada, 2014. ACM Press.
- [18] S. Bakker and K. Niemantsverdriet. The interaction-attention continuum: Considering various levels of human attention in interaction design. *International Journal of Design*, 10(2):1–14, 2016.
- [19] A. Ballit. *Design and manufacturing process optimization for prosthesis of the lower limb*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2020.
- [20] M. Beaudouin-Lafon. Interaction instrumentale: de la manipulation directe à la réalité augmentée. *Actes des neuvièmes journées sur l'Interaction Homme-Machine*, pages 97–104, 1997.
- [21] K. Berntsen, R. C. Palacios, and E. Herranz. Virtual reality and its uses: a systematic literature review. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, pages 435–439, 2016.
- [22] F. Berthaut. 3d interaction techniques for musical expression. *Journal of New Music Research*, 49(1):60–72, 2020.
- [23] F. Berthaut, M. Desainte-Catherine, and M. Hachet. Interacting with 3d reactive widgets for musical performance. *Journal of New Music Research*, 40(3):253–263, 2011.
- [24] F. Berthaut, V. Zappi, and D. Mazzanti. Scenography of immersive virtual musical instruments. In *2014 IEEE VR Workshop: Sonic interaction in virtual environments (SIVE)*, pages 19–24. IEEE, 2014.
- [25] A. Berton, U. G. Longo, V. Candela, S. Fioravanti, L. Giannone, V. Arcangeli, V. Alciati, C. Berton, G. Facchinetti, A. Marchetti, et al. Virtual reality, augmented reality, gamification, and telerehabilitation: Psychological impact on orthopedic patients' rehabilitation. *Journal of Clinical Medicine*, 9(8):2567, 2020.

-
- [26] S. A. Bin, N. Bryan-Kinns, A. McPherson, et al. Hands where we can see them! investigating the impact of gesture size on audience perception. 2017.
- [27] R. A. Bolt. “put-that-there” voice and gesture at the graphics interface. In *Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 262–270, 1980.
- [28] G. Borg. *Borg’s perceived exertion and pain scales*. Borg’s perceived exertion and pain scales. Human Kinetics, Champaign, IL, US, 1998. Pages: viii, 104.
- [29] S. Boring, M. Jurmu, and A. Butz. Scroll, tilt or move it: using mobile phones to continuously control pointers on large public displays. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group on Design: Open 24/7 - OZCHI ’09*, page 161, Melbourne, Australia, 2009. ACM Press.
- [30] D. A. Bowman, S. Coquillart, B. Froehlich, M. Hirose, Y. Kitamura, K. Kiyokawa, and W. Stuerzlinger. 3d user interfaces: New directions and perspectives. *IEEE computer graphics and applications*, 28(6):20–36, 2008.
- [31] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola, and I. Poupyrev. An introduction to 3-d user interface design. *Presence*, 10(1):96–108, 2001.
- [32] G. Burström, R. Nachabe, O. Persson, E. Edström, and A. E. Terander. Augmented and virtual reality instrument tracking for minimally invasive spine surgery: a feasibility and accuracy study. *Spine*, 44(15):1097–1104, 2019.
- [33] J. Byra and K. Czernicki. The effectiveness of virtual reality rehabilitation in patients with knee and hip osteoarthritis. *Journal of clinical medicine*, 9(8):2639, 2020.
- [34] C. Cadoz. Le geste canal de communication homme/machine: la communication “instrumentale”. *Technique et science informatiques*, 13(1):31–61, 1994.
- [35] C. G. Canning, N. E. Allen, E. Nackaerts, S. S. Paul, A. Nieuwboer, and M. Gilat. Virtual reality in research and rehabilitation of gait and balance in parkinson disease. *Nature Reviews Neurology*, 16(8):409–425, 2020.
- [36] M. Carter, E. Velloso, J. Downs, A. Sellen, K. O’Hara, and F. Vetere. Pathsync: Multi-user gestural interaction with touchless rhythmic path mimicry. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3415–3427, 2016.
- [37] G. Casiez, D. Vogel, R. Balakrishnan, and A. Cockburn. The impact of control-display gain on user performance in pointing tasks. *Human-computer interaction*, 23(3):215–250, 2008.
- [38] P. Cathébras and M. Toinon. Asthénie: conduite à tenir. *Rev Prat Med Gen*, 26:111–6, 2012.
- [39] N. Chaconas and T. Höllerer. An Evaluation of Bimanual Gestures on the Microsoft HoloLens. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 1–8, Mar. 2018.

- [40] N. Cheema, L. A. Frey-Law, K. Naderi, J. Lehtinen, P. Slusallek, and P. Hämmäläinen. Predicting mid-air interaction movements and fatigue using deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–13, 2020.
- [41] A. Chowdhury, R. Ramadas, and S. Karmakar. Muscle computer interface: A review. *ICoRD'13*, pages 411–421, 2013.
- [42] M. Cifrek, V. Medved, S. Tonković, and S. Ostojić. Surface emg based muscle fatigue evaluation in biomechanics. *Clinical biomechanics*, 24(4):327–340, 2009.
- [43] J. Cohen. A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1):155, 1992.
- [44] P. R. Cohen, M. Johnston, D. McGee, S. Oviatt, J. Pittman, I. Smith, L. Chen, and J. Clow. Quickset: Multimodal interaction for distributed applications. In *Proceedings of the fifth ACM international conference on Multimedia*, pages 31–40, 1997.
- [45] E. Cordeiro, F. Giannini, M. Monti, D. Mendes, and A. Ferreira. *A Study on Natural 3D Shape Manipulation in VR*. The Eurographics Association, 2018.
- [46] J. N. Côté, P. A. Mathieu, M. F. Levin, and A. G. Feldman. Movement reorganization to compensate for fatigue during sawing. *Experimental brain research*, 146(3):394–398, 2002.
- [47] E. T. Davis, K. Scott, J. Pair, L. F. Hodges, and J. Oliverio. Can audio enhance visual perception and performance in a virtual environment? In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 43, pages 1197–1201. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1999.
- [48] R. Day, S. Holland, D. Bowers, and A. Dil. Using spatial audio in minimal attention interfaces: Towards an effective audio gps navigation system. Technical report, Technical Report. Available online: <http://computingreports.open.ac.uk> . . . , 2006.
- [49] C. J. De Luca. Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans. *Critical reviews in biomedical engineering*, 11(4):251–279, 1984.
- [50] A. Dix, A. J. Dix, J. Finlay, G. D. Abowd, and R. Beale. *Human-computer interaction*. Pearson Education, 2003.
- [51] L. Dominjon, A. Lécuyer, J.-M. Burkhardt, P. Richard, and S. Richir. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.*, pages 19–25. IEEE, 2005.
- [52] S. Fels, A. Gadd, and A. Mulder. Mapping transparency through metaphor: towards more expressive musical instruments. *Organised Sound*, 7(2):109, 2002.
- [53] M. Fernandez. Augmented virtual reality: How to improve education systems. *Higher Learning Research Communications*, 7(1):1–15, 2017.

-
- [54] D. Ferreira, R. Oliveira, and O. Postolache. Physical rehabilitation based on kinect serious games. In *2017 Eleventh international conference on sensing technology (ICST)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [55] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6):381, 1954.
- [56] V. Florimond. Basics of surface electromyography applied to physical rehabilitation and biomechanics. *Montreal, Canada: Thought Technology Ltd*, 2009.
- [57] E. Freeman, G. Griffiths, and S. A. Brewster. Rhythmic micro-gestures: Discreet interaction on-the-go. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, pages 115–119, 2017.
- [58] A. Freivalds. *Biomechanics of the upper limbs: mechanics, modeling and musculoskeletal injuries*. CRC press, 2011.
- [59] J. Freund and E.-P. Takala. A dynamic model of the forearm including fatigue. *Journal of Biomechanics*, 34(5):597–605, May 2001.
- [60] P. Fuchs. *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2. Presses des MINES, 2006.
- [61] J. R. Fuller, K. V. Lomond, J. Fung, and J. N. Côté. Posture-movement changes following repetitive motion-induced shoulder muscle fatigue. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(6):1043–1052, 2009.
- [62] L. Genaro Motti Ader, N. Vigouroux, and P. Gorce. Biomechanical analysis of the user’s movements during tactile interaction: Postures of older aged users’ wrists. In *Proceedings of the XVI Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems, IHC 2017*, page 9. ACM: Association for Computing Machinery, 2017.
- [63] E. Ghomi, G. Faure, S. Huot, O. Chapuis, and M. Beaudouin-Lafon. Using rhythmic patterns as an input method. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1253–1262, 2012.
- [64] N. Gillian and J. A. Paradiso. Digito: A fine-grain gesturally controlled virtual musical instrument. In *Nime*, 2012.
- [65] C. Girvan. What is a virtual world? definition and classification. *Educational Technology Research and Development*, 66(5):1087–1100, 2018.
- [66] M. Goss-Sampson. *Statistical analysis in jasp: A guide for students*, 2019.
- [67] P. Graham. *SteamVR Tracking 2.0 Will Include New Mounting System and Cover Wider Play Space*, 2017.
- [68] D. Guinness, A. Jude, G. M. Poor, and A. Dover. Models for rested touchless gestural interaction. In *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction*, pages 34–43, 2015.
- [69] W. Guo, J. Ren, B. Wang, and Q. Zhu. Effects of relaxing music on mental fatigue induced by a continuous performance task: behavioral and erps evidence. *PloS one*, 10(8):e0136446, 2015.

- [70] Y. Guo, X. Yang, H. Wang, Y. Zhang, W. Xu, and D. Wang. Five-fingered passive force feedback glove using a variable ratio lever mechanism. In *Actuators*, volume 10, page 96. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.
- [71] B. Hachard. *Influence de la fatigue sur le contrôle postural: spécificités des effets d'une fatigue musculaire volontaire ou électro-induite et impact d'une fatigue mentale occasionnée par une tâche cognitive prolongée*. PhD thesis, Pau, 2019.
- [72] J. T. Hansberger, C. Peng, S. L. Mathis, V. A. Shanthakumar, S. C. Meacham, L. Cao, and V. R. Blakely. Dispelling the gorilla arm syndrome: the viability of prolonged gesture interactions. In *International conference on virtual, augmented and mixed reality*, pages 505–520. Springer, 2017.
- [73] A. Hareendran, N. K. Leidy, B. U. Monz, R. Winnette, K. Becker, and D. A. Mahler. Proposing a standardized method for evaluating patient report of the intensity of dyspnea during exercise testing in COPD. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 7:345–355, 2012.
- [74] G. W. Harrison, E. Haruvy, and E. E. Rutström. Remarks on virtual world and virtual reality experiments. *Southern Economic Journal*, 78(1):87–94, 2011.
- [75] L. Hespanhol, M. Tomitsch, K. Grace, A. Collins, and J. Kay. Investigating intuitiveness and effectiveness of gestures for free spatial interaction with large displays. In *Proceedings of the 2012 International Symposium on Pervasive Displays*, pages 1–6, 2012.
- [76] J. D. Hincapié-Ramos, X. Guo, P. Moghadasian, and P. Irani. Consumed endurance: a metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems*, pages 1063–1072. ACM, 2014.
- [77] D. E. Hinkle, W. Wiersma, and S. G. Jurs. *Applied statistics for the behavioral sciences*, volume 663. Houghton Mifflin College Division, 2003.
- [78] Z. Huang, J. Limke, and J. Kong. A Comparative Study on Inter-Device Interaction: One-Handed Interaction VS Two-Handed Interaction. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction, VINCI '16*, pages 67–74, New York, NY, USA, 2016. ACM. event-place: Dallas, TX, USA.
- [79] M. Huysmans, M. Hoozemans, A. Van der Beek, M. De Looze, and J. Van Dieën. Fatigue effects on tracking performance and muscle activity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(3):410–419, 2008.
- [80] R. J. Jacob. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 11–18, 1990.
- [81] S. Jang, W. Stuerzlinger, S. Ambike, and K. Ramani. Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors*

- in Computing Systems - CHI '17*, pages 3328–3339, Denver, Colorado, USA, 2017. ACM Press.
- [82] J. Jankowski and M. Hachet. A survey of interaction techniques for interactive 3d environments. In *Eurographics 2013-STAR*, page 30, 2013.
- [83] L. Jensen and F. Konradsen. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4):1515–1529, 2018.
- [84] A. R. Jensenius and K. A. V. Bjerkestrand. Exploring micromovements with motion capture and sonification. In *International Conference on Arts and Technology*, pages 100–107. Springer, 2011.
- [85] L. Jing and W. Xudong. Evaluation on the effects of relaxing music on the recovery from aerobic exercise-induced fatigue. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48(1):102, 2008.
- [86] R. Johnston 3rd, M. E. Howard, P. W. Cawley, and G. M. Losse. Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(12):1703–1707, 1998.
- [87] S. Jordà. Interactive music systems for everyone: exploring visual feedback as a way for creating more intuitive, efficient and learnable instruments. In *En Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, August*, pages 6–9, 2003.
- [88] H. Kang and G. Shin. Effects of touch target location on performance and physical demands of computer touchscreen use. *Applied Ergonomics*, 61:159–167, 2017.
- [89] F. Karray, M. Alemzadeh, J. Abou Saleh, and M. N. Arab. Human-computer interaction: Overview on state of the art. 2008.
- [90] M. Kay and J. O. Wobbrock. Package ‘artool’, 2020.
- [91] M. G. Kendall and B. B. Smith. The problem of m rankings. *The annals of mathematical statistics*, 10(3):275–287, 1939.
- [92] G. J. Kim. *Human-computer interaction: fundamentals and practice*. CRC press, 2015.
- [93] W.-S. Kim, S. Cho, J. Ku, Y. Kim, K. Lee, H.-J. Hwang, and N.-J. Paik. Clinical application of virtual reality for upper limb motor rehabilitation in stroke: review of technologies and clinical evidence. *Journal of clinical medicine*, 9(10):3369, 2020.
- [94] Y. Kim, H. Kim, and Y. O. Kim. Virtual reality and augmented reality in plastic surgery: a review. *Archives of plastic surgery*, 44(3):179, 2017.
- [95] K. Kin, B. Hartmann, and M. Agrawala. Two-handed marking menus for multitouch devices. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(3):1–23, July 2011.
- [96] N. Kitsunezaki, E. Adachi, T. Masuda, and J.-i. Mizusawa. Kinect applications for the physical rehabilitation. In *2013 IEEE International Symposium*

- on *Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, pages 294–299. IEEE, 2013.
- [97] D. Koons, C. Sparrell, and K. Thorisson. Integrating simultaneous input from speech, gaze, and hand gestures, intelligent multimedia interfaces, ed. by m. maybury, 1993.
- [98] B. Lafreniere, C. Gutwin, and A. Cockburn. Investigating the post-training persistence of expert interaction techniques. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 24(4):1–46, 2017.
- [99] J. V. Larsen, D. Overholt, and T. B. Moeslund. The prospects of musical instruments for people with physical disabilities. In *NIME*, volume 16, pages 327–331, 2016.
- [100] J. J. LaViola. 3d gestural interaction: The state of the field. *ISRN Artificial Intelligence*, 2013, 2013.
- [101] J. J. LaViola Jr, E. Kruijff, R. P. McMahan, D. Bowman, and I. P. Poupyrev. *3D user interfaces: theory and practice*. Addison-Wesley Professional, 2017.
- [102] M. Leman and P.-J. Maes. The role of embodiment in the perception of music. *Empirical Musicology Review*, 9(3-4):236–246, 2015.
- [103] W.-C. Li, A. Horn, Z. Sun, J. Zhang, and G. Braithwaite. Augmented visualization cues on primary flight display facilitating pilot’s monitoring performance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 135:102377, 2020.
- [104] C. List and M. Kipp. Is bigger better? a fitts’ law study on the impact of display size on touch performance. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pages 669–678. Springer, 2019.
- [105] M. Liu, M. Nancel, and D. Vogel. Gunslinger: Subtle Arms-down Mid-air Interaction. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST ’15, pages 63–71, Charlotte, NC, USA, Nov. 2015. Association for Computing Machinery.
- [106] Z. Liu, D. Vogel, and J. R. Wallace. Applying the cumulative fatigue model to interaction on large, multi-touch displays. In *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Pervasive Displays*, pages 1–9, 2018.
- [107] A. Luttmann, M. Jäger, and W. Laurig. Electromyographical indication of muscular fatigue in occupational field studies. *International journal of Industrial ergonomics*, 25(6):645–660, 2000.
- [108] T. Ma, W. Wee, C. Y. Han, and X. Zhou. A method for single hand fist gesture input to enhance human computer interaction. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 291–300. Springer, 2013.
- [109] P. Majaranta, U.-K. Ahola, and O. Špakov. Fast gaze typing with an adjustable dwell time. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 357–360, 2009.

-
- [110] S. Marks, D. White, and M. Singh. Getting up your nose: A virtual reality education tool for nasal cavity anatomy. In *SIGGRAPH Asia 2017 symposium on education*, pages 1–7, 2017.
- [111] B. Mary Costello. Paying attention to rhythm in hci: Some thoughts on methods. In *32nd Australian Conference on Human-Computer Interaction*, pages 471–480, 2020.
- [112] J. T. McConville, C. E. Clauser, T. D. Churchill, J. Cuzzi, and I. Kaleps. Anthropometric relationships of body and body segment moments of inertia. Technical report, ANTHROPOLOGY RESEARCH PROJECT INC YELLOW SPRINGS OH, 1980.
- [113] A. P. McPherson et al. Embodied cognition in performers of large acoustic instruments as a method of designing new large digital musical instruments. International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research, 2019.
- [114] S. W. Mereu and R. Kazman. Audio enhanced 3d interfaces for visually impaired users. *ACM SIGCAPH Computers and the Physically Handicapped*, pages 10–15, 1997.
- [115] G. A. Miller. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2):81, 1956.
- [116] D. Mills, F. Schroeder, and J. D’Arcy. Givme: Guided interactions in virtual musical environments:. *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 5 2021. <https://nime.pubpub.org/pub/h14o4oit>.
- [117] M. F. Montoya, J. E. Muñoz, and O. A. Henao. Enhancing virtual rehabilitation in upper limbs with biocybernetic adaptation: The effects of virtual reality on perceived muscle fatigue, game performance and user experience. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(3):740–747, 2020.
- [118] F. Mueller, F. Bernard, O. Sotnychenko, D. Mehta, S. Sridhar, D. Casas, and C. Theobalt. Ganerated hands for real-time 3d hand tracking from monocular rgb. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 49–59, 2018.
- [119] F. Mueller and K. Isbister. Movement-based game guidelines. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems*, pages 2191–2200, 2014.
- [120] A. Mulder. Virtual musical instruments: Accessing the sound synthesis universe as a performer. In *Proceedings of the First Brazilian Symposium on Computer Music*, pages 243–250. Citeseer, 1994.
- [121] B. A. Myers. A brief history of human-computer interaction technology. *interactions*, 5(2):44–54, 1998.

- [122] D. C. Niehorster, L. Li, and M. Lappe. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *i-Perception*, 8(3):204166951770820, June 2017.
- [123] J. Nielsen. Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 152–158, 1994.
- [124] M. Nielsen, M. Störring, T. B. Moeslund, and E. Granum. A procedure for developing intuitive and ergonomic gesture interfaces for hci. In *International gesture workshop*, pages 409–420. Springer, 2003.
- [125] N. C. Nilsson, T. Peck, G. Bruder, E. Hodgson, S. Serafin, M. Whitton, F. Steinicke, and E. S. Rosenberg. 15 years of research on redirected walking in immersive virtual environments. *IEEE computer graphics and applications*, 38(2):44–56, 2018.
- [126] T. Nuttall, B. Haki, and S. Jorda. Transformer neural networks for automated rhythm generation. *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 4 2021. <https://nime.pubpub.org/pub/8947fhly>.
- [127] Y.-K. Ou, Y.-L. Wang, H.-C. Chang, S.-Y. Yen, Y.-H. Zheng, and B.-O. Lee. Development of virtual reality rehabilitation games for children with attention-deficit hyperactivity disorder. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(11):5713–5720, 2020.
- [128] S. Oviatt, R. Coulston, and R. Lunsford. When do we interact multimodally? cognitive load and multimodal communication patterns. In *Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces*, pages 129–136, 2004.
- [129] A. Paludan, J. Elbaek, M. Mortensen, M. Zobbe, N. C. Nilsson, R. Nordahl, L. Reng, and S. Serafin. Disguising rotational gain for redirected walking in virtual reality: Effect of visual density. In *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 259–260. IEEE, 2016.
- [130] I. Pastor, H. A. Hayes, and S. J. Bamberg. A feasibility study of an upper limb rehabilitation system using kinect and computer games. In *2012 annual international conference of the ieee engineering in medicine and biology society*, pages 1286–1289. IEEE, 2012.
- [131] V. I. Pavlovic, R. Sharma, and T. S. Huang. Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 19(7):677–695, 1997.
- [132] J. A. Potteiger, J. M. Schroeder, and K. L. Goff. Influence of music on ratings of perceived exertion during 20 minutes of moderate intensity exercise. *Perceptual and motor skills*, 91(3):848–854, 2000.
- [133] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 79–80, 1996.

-
- [134] F. Rebelo, P. Noriega, E. Duarte, and M. Soares. Using virtual reality to assess user experience. *Human Factors*, 54(6):964–982, 2012.
- [135] Y. Rekik, W. Merrad, and C. Kolski. Understanding the Attention Demand of Touch and Tangible Interaction on a Composite Task. In *2019 International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '19*, pages 319–328, Suzhou, China, Oct. 2019. Association for Computing Machinery.
- [136] Y. Rekik, R.-D. Vatavu, and L. Grisoni. Understanding users' perceived difficulty of multi-touch gesture articulation. In *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '14*, page 232–239, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [137] S. Reyal, S. Zhai, and P. O. Kristensson. Performance and user experience of touchscreen and gesture keyboards in a lab setting and in the wild. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 679–688, 2015.
- [138] V. Reynaert, F. Berthaut, Y. Rekik, and L. Grisoni. The effect of control-display ratio on user experience in immersive virtual musical instruments. *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 4 2021. <https://nime.pubpub.org/pub/8n8br4cc>.
- [139] V. Reynaert, F. Berthaut, Y. Rekik, and L. Grisoni. The Effect of Rhythm in Mid-air Gestures on the User Experience in Virtual Reality. In C. Ardito, R. Lanzilotti, A. Malizia, H. Petrie, A. Piccinno, G. Desolda, and K. Inkpen, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, Lecture Notes in Computer Science, pages 182–191, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [140] W. Rohmert. Ermittlung von erholungspausen für statische arbeit des menschen. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 18(2):123–164, 1960.
- [141] S. Roohi, C. Guckelsberger, A. Relas, H. Heiskanen, J. Takatalo, and P. Hämäläinen. Predicting game engagement and difficulty using ai players. *arXiv preprint arXiv:2107.12061*, 2021.
- [142] S. Roohi, A. Relas, J. Takatalo, H. Heiskanen, and P. Hämäläinen. Predicting game difficulty and churn without players. In *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pages 585–593, 2020.
- [143] V. Rozand and R. Lepers. Influence de la fatigue mentale sur les performances physiques. *Movement & Sport Sciences-Science & Motricité*, (95):3–12, 2017.
- [144] J. Ruiz and D. Vogel. Soft-constraints to reduce legacy and performance bias to elicit whole-body gestures with low arm fatigue. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3347–3350. ACM, 2015.
- [145] S. Rutkowski, A. Rutkowska, P. Kiper, D. Jastrzebski, H. Rachenik, A. Turolla, J. Szczegielniak, and R. Casaburi. Virtual reality rehabilitation in

- patients with chronic obstructive pulmonary disease: a randomized controlled trial. *International journal of chronic obstructive pulmonary disease*, 15:117, 2020.
- [146] J. Sánchez and M. Sáenz. 3d sound interactive environments for problem solving. In *Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pages 173–179, 2005.
- [147] D. K. Schneider. Presence Questionnaire (PQ) - EduTech Wiki, July 2019.
- [148] J. Segen and S. Kumar. Human-computer interaction using gesture recognition and 3d hand tracking. In *Proceedings 1998 International Conference on Image Processing. ICIP98 (Cat. No. 98CB36269)*, pages 188–192. IEEE, 1998.
- [149] S. Serafin, C. Erkut, J. Kojs, N. C. Nilsson, and R. Nordahl. Virtual reality musical instruments: State of the art, design principles, and future directions. *Computer Music Journal*, 40(3):22–40, 2016.
- [150] S. S. Shapiro and M. B. Wilk. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4):591–611, 1965.
- [151] Z. Shen, C. Xue, J. Li, and X. Zhou. Effect of icon density and color contrast on users’ visual perception in human computer interaction. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, pages 66–76. Springer, 2015.
- [152] R. Shields. *The virtual*. Routledge, 2005.
- [153] B. Shneiderman. Direct manipulation: A step beyond programming languages. In *Proceedings of the Joint Conference on Easier and More Productive Use of Computer Systems. (Part-II): Human Interface and the User Interface-Volume 1981*, page 143, 1981.
- [154] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(1):17–27, 2009.
- [155] M. L. Stephenson, A. G. Ostrander, H. Norasi, and M. C. Dorneich. Shoulder muscular fatigue from static posture concurrently reduces cognitive attentional resources. *Human factors*, 62(4):589–602, 2020.
- [156] D. Stober. Stanford, SRI celebrate the dawn of interactive computing, Dec. 2008.
- [157] U. Stuber, N. Leclerc, and M.-C. Dumoulin. Eutonie et kinésiologie: Genèse et synthèse d’un projet multidisciplinaire.
- [158] I. Sutherland. The ultimate display. 1965.
- [159] M. Svahn, J. Hölling, F. Curtsson, and N. Nokelainen. The rullen band. *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 4 2021. <https://nime.pubpub.org/pub/pvd6davm>.
- [160] L. Szmedra and D. Bacharach. Effect of music on perceived exertion, plasma lactate, norepinephrine and cardiovascular hemodynamics during treadmill running. *International journal of sports medicine*, 19(1):32–37, 1998.

-
- [161] V. Teixeira. *Improving elderly access to audiovisual and social media, using a multimodal human-computer interface*. PhD thesis, University of Lisbon, 2011.
- [162] G. Tieri, G. Morone, S. Paolucci, and M. Iosa. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert review of medical devices*, 15(2):107–117, 2018.
- [163] M. Turk. Multimodal interaction: A review. *Pattern recognition letters*, 36:189–195, 2014.
- [164] M. S. Van Tonder. *The development and evaluation of gaze selection techniques*. PhD thesis, 2009.
- [165] D. Velez and P. Zlateva. Virtual reality challenges in education and training. *International Journal of Learning and Teaching*, 3(1):33–37, 2017.
- [166] E. Velloso, M. Carter, J. Newn, A. Esteves, C. Clarke, and H. Gellersen. Motion correlation: Selecting objects by matching their movement. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 24(3):1–35, 2017.
- [167] N. K. Vøllestad. Measurement of human muscle fatigue. *Journal of Neuroscience Methods*, 74(2):219–227, 1997.
- [168] J. P. Wachs, M. Kölsch, H. Stern, and Y. Edan. Vision-based hand-gesture applications. *Communications of the ACM*, 54(2):60–71, 2011.
- [169] J. Wahlström. Ergonomics, musculoskeletal disorders and computer work. *Occupational medicine*, 55(3):168–176, 2005.
- [170] G. Wakefield, M. Palumbo, and A. Zonta. Affordances and constraints of modular synthesis in virtual reality. 2020.
- [171] R. Walter, G. Bailly, N. Valkanova, and J. Müller. Cuenesics: using mid-air gestures to select items on interactive public displays. In *Proceedings of the 16th international conference on Human-computer interaction with mobile devices & services*, pages 299–308, 2014.
- [172] J.-j. Wan, Z. Qin, P.-y. Wang, Y. Sun, and X. Liu. Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Experimental & molecular medicine*, 49(10):e384–e384, 2017.
- [173] H. Wang. How will different control/display ratios influence muscle fatigue and game experience in virtual reality games?, 2016.
- [174] D. A. Williams, B. Fazenda, V. J. Williamson, and G. Fazekas. Biophysiological synchronous computer generated music improves performance and reduces perceived effort in trail runners. In R. Michon and F. Schroeder, editors, *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 531–536, Birmingham, UK, July 2020. Birmingham City University.
- [175] B. G. Witmer and M. J. Singer. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7(3):225–240, 1998.

- [176] J. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2011.
- [177] C. Yang, J. Bouffard, D. Srinivasan, S. Ghayourmanesh, H. Cantú, M. Begon, and J. N. Côté. Changes in movement variability and task performance during a fatiguing repetitive pointing task. *Journal of biomechanics*, 76:212–219, 2018.
- [178] C. Yang, S. Leitkam, and J. N. Côté. Effects of different fatigue locations on upper body kinematics and inter-joint coordination in a repetitive pointing task. *PloS one*, 14(12):e0227247, 2019.
- [179] J. Young, M. Trudeau, D. Odell, K. Marinelli, and J. Dennerlein. Wrist and shoulder posture and muscle activity during touch-screen tablet use: Effects of usage configuration, tablet type, and interacting hand. *Work (Reading, Mass.)*, 45, Mar. 2013.
- [180] V. Zappi and A. P. McPherson. Dimensionality and appropriation in digital musical instrument design. In *NIME*, volume 14, pages 455–460. Citeseer, 2014.
- [181] T. G. Zimmerman, J. Lanier, C. Blanchard, S. Bryson, and Y. Harvill. A hand gesture interface device. *ACM Sigchi Bulletin*, 18(4):189–192, 1986.
- [182] C. Zimmermann, D. Ceylan, J. Yang, B. Russell, M. Argus, and T. Brox. Freihand: A dataset for markerless capture of hand pose and shape from single rgb images. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pages 813–822, 2019.