

Evaluation subjective de l'entraînement en réalité virtuelle du Mawashi Geri

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

déposé par

Léonard Clivaz

à

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

En collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent
Prof. Dr. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller
Dr. Thibaut Le Naour

Fribourg, Janvier 2018

Table des matières

Résumé	3
1 Introduction	5
1.1 Karaté.....	5
1.2. Contrôle et apprentissage moteur	7
1.2 Situation de recherche	14
1.3 Questionnaire.....	21
1.4 Objectifs du travail	24
2 Méthode.....	26
2.1 Détail du matériel	30
3 Résultats	32
3.1 Evaluation objective	32
3.2 Evaluation subjective.....	34
4 Discussion	41
4.1 Analyse quantitative	41
4.2 Analyse qualitative	43
4.3 Synthèse.....	45
5 Conclusion.....	49
Bibliographie.....	50
Annexe	55

Résumé

Ce travail a pour but d'évaluer une méthode d'apprentissage d'un mouvement de karaté, le Mawashi Geri, en réalité virtuelle. Un point central du travail consiste à évaluer de manière subjective l'application en réalité virtuelle utilisée à l'aide d'un questionnaire.

Durant l'expérience et afin de perfectionner leur geste, les participants reçoivent un feedback interactif sur un écran géant placé quelques mètres devant eux. Equipés d'une combinaison dotée de 41 marqueurs, les sujets ont pour objectif de perfectionner le mouvement de karaté en imitant le geste d'un expert pré-enregistré et affiché sur l'écran. La combinaison munie de marqueurs permet à l'aide des 16 caméras infrarouges dans un premier temps de reconstruire le mouvement du sujet virtuellement et puis d'afficher l'avatar du sujet en direct au côté de l'expert sur l'écran. Durant l'expérience, lors de la phase d'apprentissage, les sujets reçoivent différents feedbacks selon le groupe dans lequel ils ont été distribués. Précisément, les participants sont répartis dans 4 groupes de feedbacks différents. Les feedbacks sont, pour tous les groupes, donnés à la fois en live (*online*), ainsi qu'en replay après chaque essai (*offline*). Le premier groupe, ES-ES, voit sur l'écran géant aussi bien en *online* qu'en *offline* à la fois son propre avatar et celui de l'expert. Le deuxième groupe, ES-S, voit son avatar et celui de l'expert en *online*, mais ne voit que son propre avatar en *offline*. Le troisième groupe, S-ES, voit seulement son avatar en *online* et voit les 2 avatars en *offline*. Enfin, le dernier groupe, S-S, à savoir le groupe contrôle, voit tout au long de l'expérience seulement son propre avatar.

L'intérêt de cette expérience réside en partie dans le fait que les feedbacks sont interactifs. C'est-à-dire que les sujets peuvent contrôler « temporellement » l'avatar de l'expert qui suit le mouvement du sujet. Ainsi, le sujet peut choisir la vitesse et la direction de son mouvement à sa guise.

Les sujets sont soumis à un pré-test puis un post-test afin de calculer la performance de chacun, et de voir si les participants ont augmenté leur précision grâce à la phase d'apprentissage.

Le questionnaire distribué directement après l'expérience aux participants permet d'avoir une évaluation subjective de l'application en réalité virtuelle. Nous nous sommes inspirés des études précédentes (Bozec, 2017 ; Brockmyer et al., 2009 ; Jelani, Zulkifli, Yusoff & Ismail, 2019 ; Labedan, Dehais & Peysakhovich, 2018 ; Makransky, Terkildsen & Mayer, 2017 ; Rubio, Diaz, Martin & Puente, 2004 ; Venkatesh, Morris, Davis, G.B. & Davis, F.D., 2003)

pour le diviser en 7 catégories afin d'évaluer les concepts de charge mentale, engagement, présence, utilité, usabilité, satisfaction et acceptabilité.

1 Introduction

Au quotidien, l'être humain utilise sans arrêt des schémas moteurs afin de marcher, de courir et de se déplacer. Pour effectuer ses tâches quotidiennes, il doit sauter, grimper, attraper ou encore jeter. Toutes ces actions ne sont pas innées. Dès notre naissance, nous devons apprendre et mettre en place des schémas moteurs. Ceux-ci nous permettent d'effectuer les actions nécessaires à l'interaction avec notre environnement.

Dans le domaine du sport, c'est donc tout naturellement que nous faisons également appel à de nombreux schémas moteurs. A nouveau, les gestes effectués relèvent d'un apprentissage et d'un perfectionnement. Pour apprendre les différents gestes qu'exige tel ou tel sport, l'être humain va, entre autres, apprendre par imitation. Lorsque nous cherchons à imiter un geste, certaines structures de notre cerveau s'activent afin de comparer le geste que nous effectuons avec le modèle donné, par exemple, par un entraîneur (Winnykamen, 1990). Ainsi, nous pouvons compter sur différents feedbacks afin de corriger notre geste et de l'affiner au maximum.

Dans ce travail, les participants, n'ayant jamais pratiqué de karaté, vont devoir apprendre le Mawashi Geri à l'aide de la réalité virtuelle. Ce mouvement issu du karaté consiste en un coup de pied circulaire. L'apprentissage à l'aide de la réalité virtuelle permet de recevoir divers types de feedbacks différents.

1.1 Karaté

Le karaté est une activité exigeante. Elle requiert force, souplesse, rapidité, coordination et concentration. Le karaté vise à utiliser la totalité de son énergie dans l'action, de manière précise, tant d'un point de vue spatiale que temporelle. Le karaté est un sport hautement technique et requière une chronologie très précise de la contraction des composantes musculaires afin d'optimiser l'énergie utilisée. Lors de l'exécution de mouvements de karaté, la force musculaire appliquée par le pratiquant doit être intense et brève. Un coup, qu'il soit exécuté avec les membres inférieurs ou supérieurs, engage la totalité du corps. L'abdomen joue un rôle central dans la transmission d'énergie entre haut et bas du corps (Habersetzer, 2017).

En plus des composantes corporelles, le karaté exige également de bonnes ressources mentales telles que concentration et maîtrise de soi (Habersetzer, 2017). Cet art martial permet de développer le corps et l'esprit de manière harmonieuse (Funakoshi, 1979).

Le karaté s'est donc toujours transmis, au fil des siècles, de maître à élève, par la démonstration et la distribution de feedbacks visuels et auditifs, qui amènent l'élève à affiner ses gestes et sa technique.

Dans notre expérience, les participants vont devoir effectuer un coup de pied circulaire, tiré justement de cet art martial : le Mawashi Geri. Il consiste en un coup de pied circulaire fouetté. Sa force part principalement de la rotation des hanches associée au mouvement de ressort du genou. Le pied du pratiquant va décrire un arc de cercle dans le plan horizontal afin d'atteindre le flanc de l'adversaire (Habersetzer, 2017).

Le Mawashi-Geri se déroule en 3 temps (Habersetzer, 2017):

- 1) La jambe arrière se lève, genou plié (le talon touche la fesse).
- 2) La jambe d'appui pivote de 90 degrés dans le sens de l'adversaire. Le genou se trouve donc dirigé vers l'adversaire.
- 3) On procède au coup de pied grâce à un mouvement du genou, ceci dans le plan horizontal.
- 4) Après l'impact, la jambe revient en position pliée comme lors de la phase numéro 2.



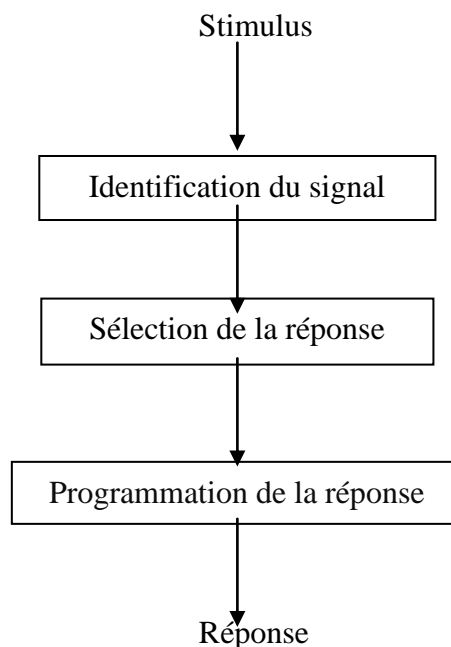
FIGURE 1. ILLUSTRATION MAWASHI-GERI (HABERSETZER, 2017, P.124)

Durant l'exécution du Mawashi-Geri, la jambe d'appui est légèrement pliée. Le pied d'appui doit suffisamment pivoter, au risque de perdre en allonge. Le genou de la jambe qui va frapper l'adversaire doit être élevé et la jambe, avant le déclenchement, doit être pliée au maximum afin d'augmenter la distance de l'arc de cercle. Au début du mouvement, le buste doit rester le plus vertical possible alors qu'au moment de la rotation des hanches, le tronc se met de côté. L'exécution de ce coup de pied circulaire demande un gainage important de la ceinture abdominale ainsi que des capacités d'équilibre, de souplesse et de force évidentes (Habersetzer, 2017).

1.2. Contrôle et apprentissage moteur

Le contrôle moteur est un processus complexe. De nombreux systèmes entrent en jeu lors de l'exécution d'un mouvement. Ceux-ci communiquent entre eux afin d'exécuter un mouvement (Schmidt, Lee, Winstein, Wulf & Zelaznik, 2018). Nous rappelons brièvement les notions de base du contrôle moteur et de l'apprentissage moteur.

1.2.1 Contrôle moteur. Chaque mouvement exécuté, peu importe le sport, demande le recrutement de muscles dans un ordre bien précis qui fait appel à ce que l'on appelle des programmes moteurs. Selon l'approche cognitive, la réponse motrice à un stimulus se déroule comme suit (Delignières, 2017) :



Dans cette théorie, le cerveau est semblable à un ordinateur qui reçoit l'information et va la traiter. Plus le stimulus est complexe, plus le temps de traitement de l'information sera grand. Deux questions se posent alors : si un programme moteur renvoie à un mouvement, comment notre organisme est-il capable de stocker les milliers de programmes moteurs nécessaires à l'interaction avec notre environnement, et comment effectuer de nouvelles actions pas encore connues ?

En effet, un coup droit en tennis, par exemple, est défini par sa singularité. Il ne ressemblera jamais de manière parfaite à un autre coup droit puisqu'il dépendra de nombreux paramètres

comme la hauteur de la balle et sa vitesse, la position du joueur qui frappe et de son adversaire, la zone visée sur le terrain, etc. (Fargier, 2006).

Selon Schmidt (1982), ces programmes moteurs sont, en réalité, stockés sous forme de programmes moteurs généralisés et ces programmes moteurs généralisés renvoient à un type de mouvement et non pas à un mouvement isolé. Ces programmes moteurs généralisés sont spécifiés, c'est-à-dire qu'ils sont adaptables à une situation précise par le sujet qui va pouvoir en modifier certains paramètres comme l'amplitude, la vitesse, la durée ou la trajectoire afin d'exécuter le bon mouvement dans la bonne situation (Delignières, 2017).

Afin d'adapter au mieux le mouvement à l'exigence de la situation, J.A. Adams (1992) propose un modèle du contrôle moteur en boucle fermée qui met l'accent sur les feedbacks, internes et externes, qui parviennent au sujet afin de corriger les erreurs et d'améliorer le geste. Pour J.A. Adams, « *la capacité de détecter et de corriger les erreurs [...] est centrale pour le processus d'apprentissage* » (Adams, 1992, p. 31). Ainsi, au fur et à mesure des essais, le sujet va produire une réponse et va, grâce à l'aide des feedbacks, pouvoir se rapprocher de la perfection (Fargier, 2006).

La pratique amène donc le sujet à explorer un grand nombre de degrés de liberté, ce qui va lui permettre de régler de manière de plus en plus précise ses mouvements (Delignières, 2017).

Le schéma présenté plus haut peut être développé. La « réponse » du schéma précédent correspond, sur la figure ci-dessous (figure 2), à la partie inférieure. Après avoir programmé la réponse, qui correspond ici à un programme moteur, nous envoyons les stimuli depuis le cerveau vers les muscles en passant par la moelle épinière. Les muscles vont s'activer et se mettre en marche, ce qui va créer un mouvement, qui va lui-même avoir une influence sur l'environnement. Ce schéma intègre également les différents feedbacks afin de voir à quel moment apparaissent les feedbacks, qui vont nous aider à corriger notre geste et à atteindre le geste voulu. Lors de la programmation de la réponse (*Response programming*), nous disposons d'une « référence », appelée aussi *feedforward*. Cette référence correspond au geste parfait que nous voudrions, dans l'idéal, effectuer. Nous avons donc, à l'avance, un geste référence à atteindre. Lorsque nous effectuons un mouvement, nous allons comparer le mouvement effectué au mouvement de référence afin de voir si nous avons exécuté le bon geste. En comparant le geste effectué au geste référence, nous sommes capables d'identifier les erreurs commises et de les corriger afin de nous rapprocher au maximum du mouvement souhaité (Schmidt et al., 2018).

Pour comparer le mouvement effectué avec le mouvement référence, nous disposons de feedbacks qui nous informent sur le mouvement qui vient d'être effectué. Ces feedbacks sont

de nature visuelle, auditive et proprioceptive. Les feedbacks proprioceptifs nous sont transmis par différents systèmes récepteurs, à savoir le système vestibulaire, les récepteurs musculaires, les récepteurs articulaires et les récepteurs cutanés. Ce sont donc ces différents feedbacks qui vont nous permettre de faire une comparaison entre le geste effectué et le geste référence afin de déceler les erreurs et les corriger. A ce niveau-là, comme présenté sur le schéma, la boucle recommence (Schmidt et al., 2018).

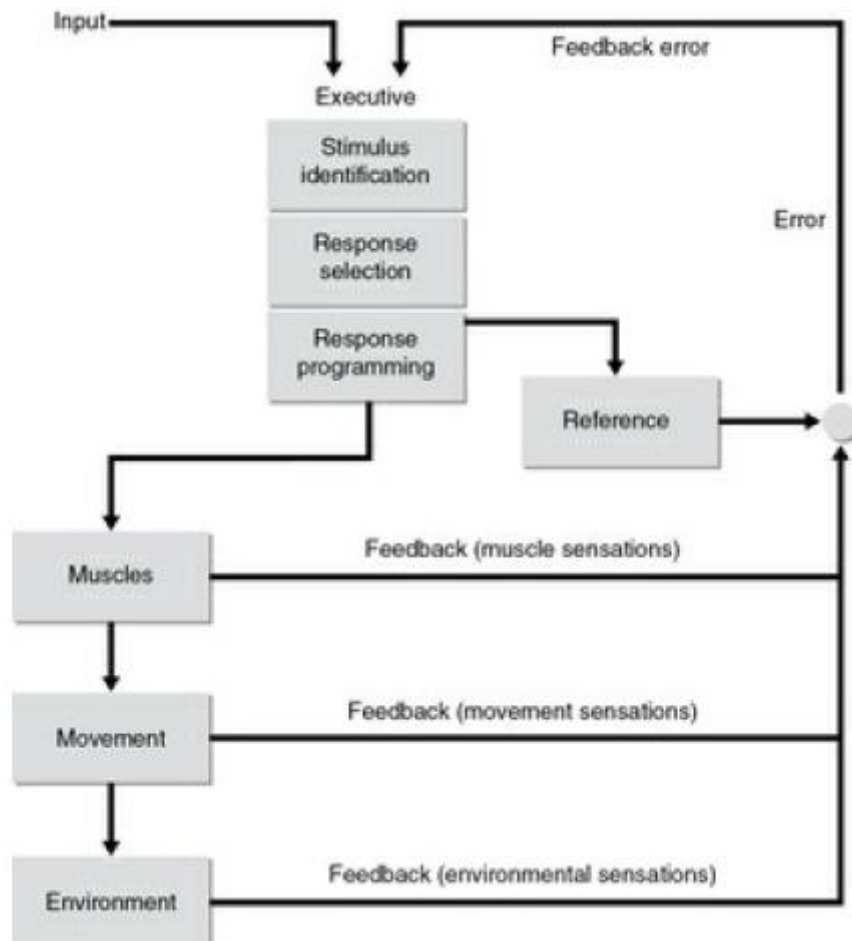


FIGURE 2. SCHÉMA CONTRÔLE MOTEUR (SCHMIDT ET AL., 2018, P. 229)

1.2.2 Apprentissage moteur. Selon Fleischmann (1967, cité d'après Delignières, 2017), « *l'apprentissage est le processus neurologique interne supposé intervenir à chaque fois que se manifeste un changement qui n'est dû ni à la croissance, ni à la fatigue* » (p. 68). Une autre définition de Schmidt définit l'apprentissage comme ceci : « *Motor learning is a set of processes associated with practice or experience leading to relatively permanent changes in the capability for skilled movement* » (Schmidt et al., 2018, p. 410), qui met en avant le fait

que l'apprentissage découle d'une expérience vécue par la personne qui amène un changement et qui est caractérisé par sa capacité à durer dans le temps.

L'apprentissage permet de créer ce que l'on appelle des habiletés. Durand (1987, cité par Delignières, 2017) définit l'habileté comme « *la capacité à élaborer et à réaliser une réponse efficace et économique pour atteindre un objectif précis* » (p. 68). Ces habiletés vont ainsi nous permettre d'exécuter divers mouvements, plus ou moins complexes selon la tâche à effectuer.

L'apprentissage peut être vu comme une succession de phases. Fitts et Posner l'ont découpé en 3 stades (Delignières, 2017) :

La première phase est appelée « **stade cognitif** ». Lors de l'apprentissage d'un nouveau mouvement, le sujet passe par ce premier stade qui exige un important travail cognitif. Au travers de ce travail, il va devoir saisir le but à atteindre ainsi que les différents moyens à mettre en œuvre pour l'atteindre. Lors de cette phase, les mouvements apparaissent comme saccadés et peu sûrs d'eux. On considère cette phase terminée lorsque le sujet est à même de fournir une réponse motrice concluante, c'est-à-dire une réponse qui permette d'atteindre son but, sans pour autant être la plus efficiente.

La seconde phase, le « **stade moteur** », est la phase durant laquelle le sujet va affiner le programme moteur. Il y a un travail de paramétrisation, ce qui permet d'ajuster le programme moteur à exécuter des tâches bien précises.

La troisième et dernière phase porte le nom de « **stade autonome** ». Durant cette phase, tant la tâche de perception que celle de décision et d'exécution deviennent autonome. Cela veut dire que le sujet n'a plus besoin de porter consciemment son attention sur les différentes tâches. Le programme moteur est automatisé et l'habileté gagne en efficacité énergétique. (Melton, 1964).

Lors de ces différentes phases d'apprentissage, il faut bien comprendre que des changements s'opèrent au niveau neuronal. Ces changements qui ont lieu dans le système nerveux central sont des phénomènes très complexes qui créent ou développent des voies neuronales. Ces voies neuronales correspondent aux chemins qu'empruntent les stimuli envoyés par notre cerveau vers nos muscles afin d'effectuer un mouvement. Lors de l'apprentissage d'un nouveau mouvement, de nouvelles voies apparaissent, tandis que, lorsque l'on va travailler et répéter ce mouvement, ces voies vont devenir de plus en plus solides, et le geste sera donc de plus en plus maîtrisé, puisque la communication entre les neurones sera meilleure (Schmidt et al., 2018).

Bernstein (1967, cité par Delignières, 2017), qui donne comme caractéristique aux programmes moteurs d'avoir de nombreux degrés de liberté, voit « *l'apprentissage comme la maîtrise progressive des degrés de liberté* » (p. 79). L'apprentissage mène à l'exploitation de plus en plus précise de ces degrés de liberté.

L'apprentissage d'un mouvement, dans le domaine du sport comme dans n'importe quel autre domaine, est indissociable de la répétition. La répétition va permettre, grâce à l'utilisation des différents feedbacks, la correction des erreurs et donc, le perfectionnement du mouvement (Delignières, 2017).

En sport, lors de la phase d'apprentissage, on associe bien souvent l'apprentissage à la démonstration, et donc, à l'observation. Selon Bandura (1977), la démonstration permet à l'apprenant de se créer un modèle cognitif interne du mouvement, qui sera par la suite traduit en action motrice. Lors de la construction de la représentation interne, les feedbacks sont bien sûr primordiaux. Sans feedbacks, il n'y a pas d'apprentissage (Vereijken & Whiting, 1990).

1.2.3 Feedbacks. Les feedbacks sont bien sûr primordiaux à l'apprentissage. Selon Schmidt (1999) le feedback « *représente l'information concernant la différence entre l'état d'un objectif et la performance* » (p. 254). Ils sont multiples et l'arrivée, ces dernières décennies, des nouvelles technologies a permis de multiplier les possibilités de feedbacks. Lorsque l'on effectue un mouvement, il est possible de recevoir des feedbacks à trois moments différents : avant l'action, pendant l'action et après l'action. Ce sont eux qui vont permettre l'apprentissage en nous informant sur les caractéristiques du geste et donc, nous permettre de procéder à une comparaison entre geste effectué et référence. Les feedbacks revêtent également un aspect motivationnel pour l'apprenant (Schmidt et al., 2018). Ils peuvent être classés en diverses catégories.

Intrinsèque et extrinsèque. Le feedback peut varier selon son focus. Il existe le feedback intrinsèque et le feedback extrinsèque. Le feedback intrinsèque correspond au feedback qui vient de l'apprenant lui-même par le biais de ses divers canaux perceptifs comme le système proprioceptif, vestibulaire ou encore visuel (Schmidt, 1993). Le feedback extrinsèque, ou augmenté, correspond à tous feedbacks extérieurs à l'individu, et il comprend bien sûr le traditionnel feedback verbal donné par l'entraîneur par exemple, mais également des feedbacks vidéo ou photos, ainsi que des feedbacks sonores ou même haptiques (Sigrist, Rauter, Riener & Wolf, 2013).

Les intérêts des feedbacks augmentés sont bien sûr multiples du point de vue de l'apprentissage pur, mais il est également intéressant de souligner le côté motivationnel de ce

genre de feedback pour l'apprenant, ce qui va permettre d'exploiter au maximum les capacités d'apprentissage des sportifs (Schmidt, 1993).

Performance et résultat. Les feedbacks peuvent fournir deux types d'informations différents à l'apprenant. Ils peuvent informer soit sur la performance effectuée, soit sur le résultat obtenu. Le feedback porté sur le résultat permet de savoir si la tâche est réussie ou non, et si non, de savoir si l'on est proche du résultat attendu ou pas. Le feedback porté sur la performance permet lui de connaître la qualité de l'exécution d'un mouvement. Grâce au feedback centré sur la performance, la personne peut se construire une représentation mentale du mouvement à effectuer (Buekers, 1995 ; Schmidt, 1993). Si la connaissance du résultat peut, selon le cas, être prédit par l'apprenant lui-même (feedback intrinsèque), la connaissance de la performance nécessite le plus souvent un feedback extrinsèque, tout du moins au début de l'apprentissage, lorsque la personne n'est pas en mesure de savoir précisément par elle-même à l'aide de ses capacités proprioceptives si le geste effectué est proche du geste parfait ou pas (Magill, 1993).

Il semblerait que la connaissance de la performance soit plus compliquée à exploiter que la connaissance du résultat pour le débutant. Cependant, certaines études montrent que la connaissance de la performance est la formule la plus intéressante pour apprendre des mouvements complexes polyarticulaires (Kernodle & Carlton, 1992).

Online et Offline. Les feedbacks se caractérisent également par le moment durant lequel l'apprenant les reçoit. Il est ainsi possible de communiquer le feedback au moment même de l'exécution du geste, ce que l'on appelle un feedback simultané ou online, ou de donner le feedback après l'exécution de la tâche, appelé feedback différé ou offline (Swinnen, Lee, Verschueren, Serrien & Bogaerds, 1997).

Le Feedback vidéo. C'est à partir des années 70 qu'un réel intérêt pour ce type de feedback est naît (Merian & Baumberger, 2007). Ce type de feedback permet ainsi à la personne de connaître directement sa performance et de la comparer à sa propre représentation mentale du geste. En s'aidant de la vidéo, l'apprenant va pouvoir affiner au maximum la précision de son geste (Schmidt, 1993). L'intérêt de la vidéo réside également dans le fait que la performance peut être visualisée à plusieurs reprises et l'entraîneur, par exemple, peut choisir la vitesse de visualisation, afin de concentrer l'attention de l'apprenant sur un détail en particulier. Ceci va permettre à l'apprenant de décortiquer le mouvement et de le comprendre au mieux (Mohnsen, 2001).

Le feedback vidéo étant riche en information, il faut cependant veiller à faire attention à son utilisation, au risque de surcharger l'apprenant d'informations et d'en perdre les bénéfices

(Rothstein & Arnold, 1976). Effectivement, si la vidéo est montrée de manière brute à l'apprenant, celui-ci a de grandes chances de se perdre dans la multitude d'information qu'il reçoit. Il est donc important de guider l'attention de la personne lors de l'utilisation de la vidéo (Schmidt et al., 2018).

Une étude menée en 2016 par Ahmad Arbabi et Maliheh Sarabandi a démontré que l'utilisation conjointe du feedback vidéo de l'apprenant et de celui d'un expert aboutissait aux meilleurs résultats pour l'apprentissage d'une tâche motrice.

Feedback vidéo virtuel interactif. Le feedback vidéo virtuel interactif consiste, dans le cas de notre étude, à superposer visuellement et synchroniser temporellement le squelette (avatar) d'un expert à celui d'un apprenant. Nous évaluons dans ce travail le potentiel d'une telle technologie. En effet, le fait de pouvoir se comparer de manière précise à un expert du domaine devrait avoir une portée pédagogique innovante et conséquente. De la même manière, cette technologie permettrait à tout un chacun d'apprendre avec les « référents » de la discipline, qui, par leur niveau de performances, s'approchent par définition du geste parfait. Pédagogiquement, ce feedback permettrait donc d'entrer dans une nouvelle dimension tout en favorisant l'aspect motivationnel de l'apprenant.

Dans le cas présent, l'apprentissage du Mawashi Geri, il a tout d'abord fallu créer le mouvement du coup de pieds circulaire (Mawashi Geri) à l'aide d'un expert en karaté. Pour ce faire, l'expert a été vêtu d'une combinaison noire moulante, équipée de 41 marqueurs permettant la reconstruction de son squelette et d'enregistrer le mouvement de coup de pied circulaire, tout cela grâce à la capture de 16 caméras.

Par la suite, les sujets s'équipent de la même combinaison que l'expert, ce qui va permettre d'enregistrer et de reproduire en direct le squelette de l'apprenant. De cette manière, les sujets vont voir à l'écran devant eux leur propre squelette, synchronisé en temps et en espace à celui de l'expert. La particularité de ce feedback est que l'apprenant dispose d'une certaine maîtrise sur le feedback puisque c'est lui qui, en exécutant le mouvement, va également activer le mouvement de l'expert. Il est également possible pour l'apprenant de gérer la vitesse à laquelle il désire exécuter son geste, vitesse que suivra également l'avatar de l'expert. Ce feedback augmente de manière importante l'interactivité entre l'apprenant et le professeur.

Ce type de feedback correspond donc à un feedback extrinsèque centré sur la performance. A choix, le feedback peut être donné en simultané ou en différé. Afin d'être efficace, il paraît important que les tâches enseignées soient de nature fermées (Merian & Baumberger, 2007).

1.2 Situation de recherche

Depuis plusieurs années, la réalité virtuelle tend à s'inviter dans de nombreux domaines. Si ces apparitions se font de plus en plus fréquentes depuis une dizaine d'années maintenant, elle a déjà commencé à se développer dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle. A l'origine, la réalité virtuelle se serait développée pour deux raisons majeures : afin, tout d'abord, de « proposer aux utilisateurs de nouvelles expériences », et ensuite, afin de l'utiliser pour la « formation sous environnement virtuel » (Bozec, 2017, p. 13). Il paraît clair qu'elle va, dans les années à venir, prendre une place de plus en plus conséquente dans différents domaines.

Aujourd'hui, elle touche une large palette de secteurs. La réalité virtuelle est bien sûr de plus en plus présente dans les domaines du divertissement comme les jeux vidéo, le cinéma et les parcs d'attractions. Dans ce secteur d'application, la réalité virtuelle est difficilement concurrencée du point de vue des sensations qu'elle peut faire ressentir à l'utilisateur. Elle fait également son apparition dans des domaines plus utilitaires, comme les transports, avec par exemple, la création de cargos pilotés à distance en réalité virtuelle, projet qui sera lancé en 2020 (Labbe, 2017). Dans le secteur du bâtiment et de l'architecture également, où la réalité virtuelle permet de visualiser de manière précise autant l'intérieur que l'extérieur d'un bâtiment (Labbe, 2019). Le secteur militaire s'intéresse également à la réalité virtuelle, tant pour l'entraînement de ses troupes que pour la visualisation 3D du champ de bataille (Silem, 2016).

La réalité virtuelle a également une place intéressante à se faire dans les domaines de la formation et de l'apprentissage. Dans ces domaines-là, l'impact que peut avoir la réalité virtuelle est grand et reste encore à développer. La médecine s'intéresse de plus en plus à la réalité virtuelle notamment pour former les chirurgiens. En effet, de plus en plus de médecins en chirurgie sont formés à l'aide de la réalité virtuelle. Dans une étude de Kühnapfel, Cakmak & Maass menée en Allemagne en 2000 déjà, la réalité virtuelle a été utilisée pour l'entraînement des médecins et futurs médecins concernant des chirurgies endoscopiques. Dans le secteur de l'aviation également, la création d'un espace 3D virtuel représentant un cockpit d'avion permet aux futurs pilotes de s'entraîner au pilotage en tentant d'être au plus proche des conditions réelles de vol (Labedan et al., 2018). La réalité virtuelle, dans ces domaines-là, permet de former du personnel en diminuant à la fois les risques et les coûts que pourraient engendrer une formation plus classique.

La réalité virtuelle est également utilisée dans le secteur de l'apprentissage/réapprentissage moteur. La technologie est passablement employée dans la réhabilitation de diverses manières. Des expériences ont entre autres été menées avec des patients atteints de la maladie

de Parkinson et les résultats ont été concluants (Dockx et al., 2016). La technologie est également exploitée dans la réhabilitation de personnes victimes d'accident vasculaire cérébral (Cano Porras et al, 2019 ; Kim, Schweighofer & Finley, 2019 ; Laver et al., 2017).

1.2.1 Réalité virtuelle et conditions d'application. Au cours des 2 dernières décennies, plusieurs expériences en réalités virtuelles ont également été menées dans le domaine du sport. L'intérêt de la technologie en réalité virtuelle dans ce domaine se situe en partie au niveau de l'apprentissage de certains mouvements corporels propre à chaque discipline. La RV permet entre autres de fournir de nombreux types de feedbacks aux apprenants et donne également la possibilité d'apprendre par mimétisme.

Les différents travaux en réalité virtuelle dans le domaine du sport ont permis de tirer certains enseignements afin d'exploiter de manière optimale la technologie. Miles, Serban, Simon, Gavin et Nigel (2012), dans un objectif de développement de l'utilisation de la réalité virtuelle à large échelle, proposent 3 critères pour assurer l'intérêt du public pour la technologie dans le cadre d'un entraînement sportif. Il faut tout d'abord que l'environnement en réalité virtuel soit suffisamment réaliste, afin que l'apprenant puisse s'identifier à son environnement. Il faut ensuite que la technologie soit abordable aux utilisateurs, tant d'un point de vue économique que logistique. Et pour finir, il faut que l'utilisation de la réalité virtuelle pour l'entraînement sportif ait été bien sûr étudiée et validée. Ainsi, Miles et al. (2012), en faisant référence au livre de Schmidt et Lee concernant le contrôle moteur (2005), ont fixé 4 conditions pour que la réalisation d'un mouvement en réalité virtuelle soit efficace : il faut que le mouvement à exécuter lors de l'entraînement en réalité virtuelle soit identique à celui à exécuter dans la réalité, à savoir la force et le timing. Il faut que les conditions de départ soient également réalistes et que l'apprenant performe dans une variété de conditions initiales afin de se rapprocher de la réalité au maximum, c'est-à-dire la position de départ, les conditions de l'environnement et le poids et la taille des différents objets avec lesquelles l'apprenant se trouvera en interaction. Il faut que le résultat de l'action dans l'environnement virtuel corresponde à celui obtenu dans la réalité. Il faut que les conséquences sensorielles de l'action, comprenons ici conséquences visuelles, auditives et proprioceptives, soient au plus proche de ce qui se passe dans la réalité. Selon Miles et al. (2012), si l'une ou l'autre de ces conditions ne sont pas respectées, le transfert entre l'environnement en réalité virtuelle et la réalité en sera péjoré.

Une question qui doit se poser à un moment ou un autre en réalité virtuelle, c'est de savoir à quel point l'environnement virtuel doit être réaliste pour que les apprenants s'identifient de manière adéquate à l'environnement virtuel et que la tâche qu'ils y apprennent va engendrer un transfert vers la réalité. Vignais et al. (2010), soutiennent que le réalisme des graphismes n'a pas besoin d'être extrêmement poussé. En effet, des résultats peuvent déjà être obtenus en utilisant des graphismes relativement simplistes. Dans notre expérience, les graphismes ont été simplifiés tout en permettant cependant une identification très facile et rapide avec l'avatar. L'image ci-dessous (gauche) correspond à l'avatar que les sujets voyaient devant eux sur l'écran. L'image des participants y est représentée à l'aide de plusieurs segments représentant les différents membres à savoir un segment pour les pieds, un segment cheville-genou, un segment genou-hanche et un segment pour la hanche, reliant les deux têtes fémorales. Nous avons choisi de ne représenter à l'écran que le bas du corps afin d'éviter une surcharge au niveau du traitement des feedbacks. En effet, il semblerait que lorsque l'apprenant doit traiter trop de feedbacks à la fois, il en perdrait les bénéfices, dû à une incapacité à traiter et à intégrer toutes les informations (Salmoni, Schmidt & Walter, 1984). Miles et al. (2012) ont également expliqué que, lorsque l'apprenant reçoit trop de feedbacks, il en devient dépendant et oublie en quelque sorte d'être attentif à ses propres feedbacks proprioceptifs. Ruffaldi, Bardy, Gopher et Bergamasco (2011) ainsi que Eaves, Breslin, Schalk et Spears (2011) ont mis en avant l'importance d'attirer l'attention de l'apprenant sur les articulations et les membres clés. Dans notre expérience, le fait de ne projeter à l'écran que le bas du corps va permettre à l'apprenant de cibler un point clé du feedback plutôt que de se perdre en traitant parfois des parties du corps peu pertinentes pour l'exécution d'un Mawashi-Geri. L'image de droite représente le squelette, que nous avons utilisé ensuite pour analyser les données.

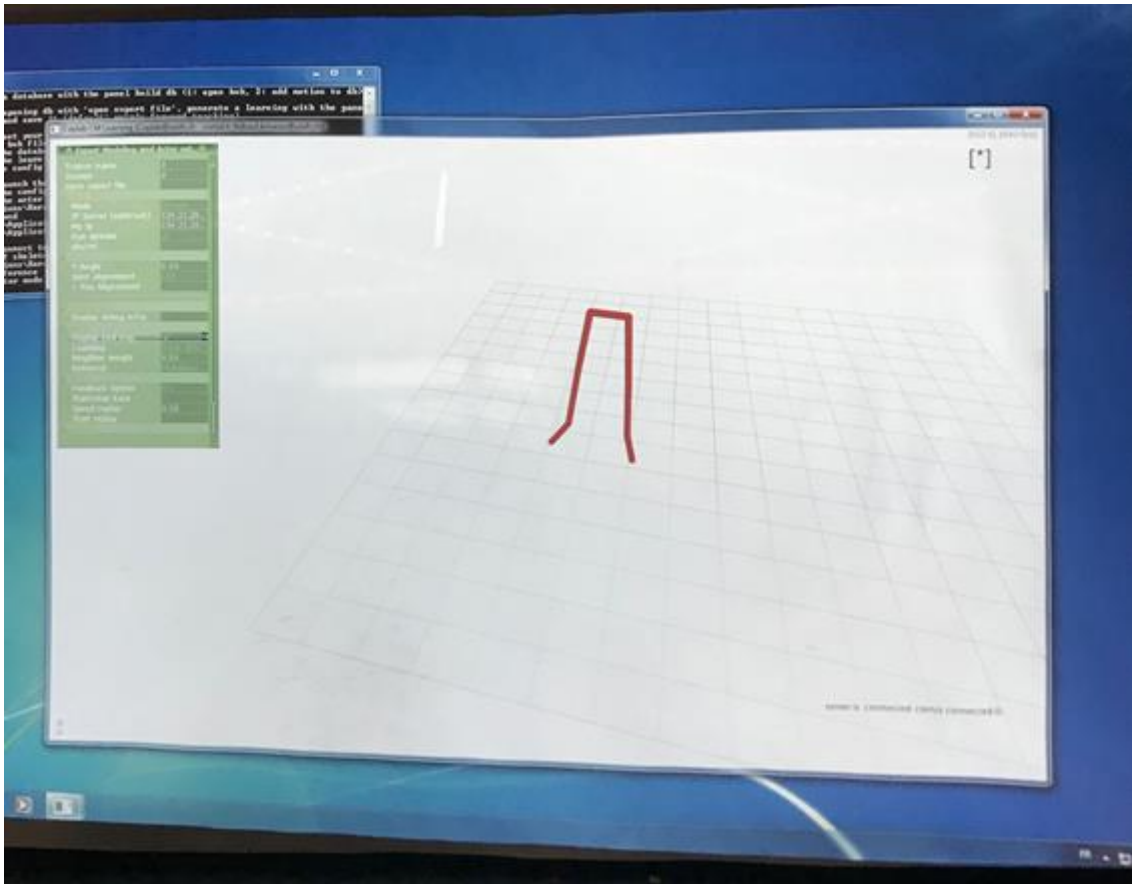


FIGURE 3. AVATAR REPRÉSENTÉ À L'ÉCRAN POUR LES PARTICIPANTS

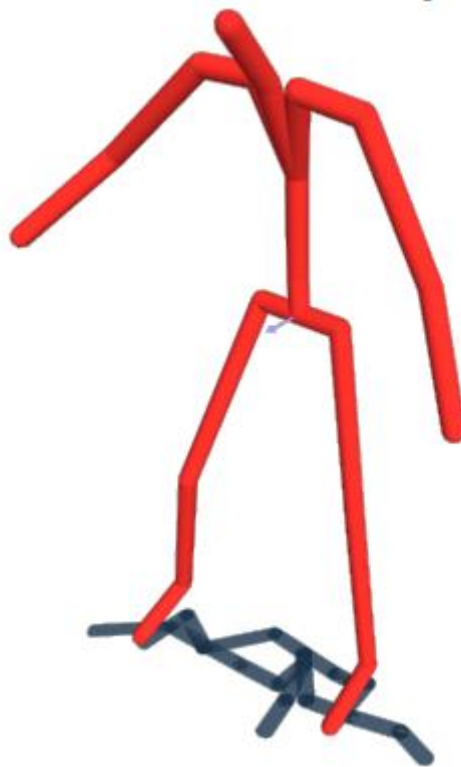


FIGURE 4. AVATAR COMPLET UTILISÉ POUR L'ANALYSE DE DONNÉES

Un autre élément primordial permettant une exploitation optimale de la technologie de la réalité virtuelle est l'absence de latence. En effet, il est important que l'environnement soit réactif et que l'avatar représenté à l'écran suive de manière parfaite, en termes d'espace et de temps, le sujet (Li, Shark, Hobbs & Ingham, 2010).

Dans leur étude concernant les méthodes d'apprentissage des arts martiaux pour les débutants, Chye, Sakamoto & Nakajima (2012) relèvent également les différents points abordés ici à savoir une haute précision dans l'espace entre le sujet et l'avatar, une activité orientée sur un but précis qui se rapproche au maximum de la réalité, l'avatar doit être suffisamment fidèle au sujet, et le système doit être réactif, sans latence donc.

1.2.2 La réalité virtuelle dans le sport. L'utilisation de la réalité virtuelle en sport offre de multiples avantages. Elle permet de créer sur mesures certaines situations sportives qui pourraient être parfois compliquées à reproduire, ou demanderaient un investissement en temps et en personnes conséquent. Elle permet, selon le sport, de varier indéfiniment les situations, de changer de point de vue et de recevoir donc plus de feedbacks que durant un entraînement plus classique, et permet également de cibler très précisément le feedback grâce aux différentes possibilités qu'elle offre (Ruffaldi et al., 2011 ; Gray, 2017 ; Bailenson et al., 2008).

Dans notre cas, les feedbacks données aux apprenants sont particulièrement intéressants puisqu'ils sont d'emblées ciblés, et le fait que l'avatar de l'expert s'adapte en termes de temps aux sujets est intéressant puisque cela leur permet de voir, à la vitesse voulue et aux stades souhaités, le mouvement et le revoir indéfiniment au ralenti par après. Ceci permet aux sujets de traiter de manière efficace le feedback et d'en tirer le maximum. Notre système est également pertinent et innovant puisqu'il permet aux apprenants de se comparer en direct à un expert de la discipline.

Bideau et al. (2004) ont utilisé de manière concluante la réalité virtuelle en handball afin de voir la réaction des gardiens dans un face-à-face avec un attaquant. Brault, Bideau, Kulpa et Craig (2009) ont utilisé la technologie afin d'analyser des situations de 1 contre 1 en rugby. En 2019, Michalski et al. ont, eux, utilisé, également de manière concluante, la réalité virtuelle en tennis de table. Un groupe de sujet devait s'entraîner en réalité virtuelle tandis qu'un groupe contrôle ne s'entraînait pas. Les résultats ont montré que le groupe qui s'entraînait en réalité virtuelle ont amélioré leur gestuelle, ce qui prouve qu'il y a eu transfert entre la RV et la réalité.

Concernant les feedbacks, il y a une distinction à faire entre ceux qui donnent une information extérieure au sujet, comme la connaissance du résultat, et ceux donnant un feedback sur le sujet lui-même. Nous allons ici nous intéresser aux études dans lesquelles les sujets recevaient des feedbacks sur eux-mêmes. L'utilisation de la réalité virtuelle semble intéressante pour les activités sportives dont l'expression corporelle est centrale, comme la danse. Plusieurs expériences ont été menées dans ce domaine-là. Dans une expérience (Chan, Leung, Tang & Komura, 2011), les participants se voyaient proposer l'apprentissage de mouvements de danse. L'avatar d'un danseur professionnel fut créé en utilisant une combinaison munie de capteurs. Les participants enfilaient ensuite à leur tour la combinaison, ce qui permettait de retransmettre en direct l'avatar du sujet sur un grand écran. L'avatar du sujet était alors positionné quelques mètres à côté de celui, pré-enregistré, du danseur, et le sujet n'avait plus qu'à imiter le danseur. Le sujet recevait ensuite un feedback différé du mouvement effectué. Les résultats de cette expérience furent concluants puisque les apprenants s'améliorèrent de manière significative. Dans une autre expérience (Eaves et al., 2011), les sujets étaient munis de la même combinaison que pour l'expérience précédente et devaient également apprendre des mouvements de danse. Ils avaient devant eux, sur un grand écran, une vidéo d'une danseuse experte qui effectuait les mouvements. Les sujets devaient eux, en même temps, tenter d'imiter les mouvements. Selon le groupe dans lequel les sujets étaient répartis, ils recevaient différents feedbacks en direct à l'écran sous forme de points blancs correspondant à la position des différentes articulations. Un groupe recevait 12 points de feedback tandis qu'un autre groupe ne recevait que 4 points de feedback correspondant aux poignets et aux chevilles. Les 2 groupes ont montré des améliorations, cependant le groupe ne bénéficiant que des 4 points de feedbacks a montré une plus grande amélioration. Ceci s'explique du fait, comme dit plus haut, que les sujets ayant 12 points de feedbacks se retrouvaient submergés par le trop grand nombre de feedbacks. Toujours concernant la danse (Anderson, Grossmann, Matejka & Fitzmaurice, 2013), les expérimentateurs reconstruisaient le squelette du sujet à l'écran sous forme de « fil de fer », qui se voyait donc en direct, et imitait la vidéo de l'expert en danse qui apparaissait dans le coin inférieur de l'écran. Les sujets recevaient des feedbacks en direct d'une part, puisque les articulations qui n'étaient pas bien alignées étaient signalées en rouge, et d'autre part en différé, où là, le squelette du sujet était comparé à celui de l'expert en danse. L'analyse des résultats dans cette expérience a montré que l'utilisation de la réalité virtuelle permettait une meilleure amélioration qu'en utilisant la vidéo comme moyen d'enseignement.

Des expériences ont également été menées dans le cadre des arts martiaux. Dans une étude de Burns et al. (2011), les expérimentateurs ont cherché à comparer trois techniques d'apprentissage à savoir, la technique classique où l'apprenant suit un cours de karaté avec un professeur, l'apprentissage à l'aide de la vidéo, et enfin l'apprentissage en réalité virtuelle. Dans cette expérience, les sujets devaient apprendre un coup de pied de karaté (Mae Geri). Les sujets apprenant en réalité virtuelle avaient devant eux à l'écran un professeur virtuel et devaient chercher à l'imiter. Les résultats ont montré que les 3 groupes se sont significativement améliorés, sans pour autant avoir une différence entre les groupes, ce qui veut dire que la réalité virtuelle, dans ce cas-là, était au moins autant efficace qu'un entraînement classique ou qu'un entraînement vidéo.

Plus récemment, Jelani et al. (2019) ont mis au point un entraînement pour le Taekwondo en réalité virtuelle. Comme pour les expériences précédentes, les apprenants voient le professeur créé virtuellement exécuter des mouvements de cet art martial. Les sujets avaient la possibilité de voir le professeur sous l'angle souhaité et à des vitesses différentes afin de pouvoir se représenter au mieux les gestes à effectuer. Les expérimentateurs ont soumis un questionnaire aux participants afin d'évaluer la technologie. Autant l'analyse des données objectives que celles du questionnaire étaient concluantes.

Dans une autre expérience (Hoang, Reinoso, Vetere & Tanin, 2016), les sujets étaient équipés d'un casque de réalité virtuelle et de la combinaison à marqueurs. L'objectif était d'apprendre certains mouvements de karaté. Grâce au casque, les apprenants avaient la possibilité de voir le squelette du professeur soit à la troisième personne, soit à la première personne, autrement dit, les sujets étaient « à l'intérieur » du corps du professeur et pouvait voir le mouvement des différents membres du corps. Les sujets devaient ensuite suivre les mouvements du professeur en voyant également leurs propres membres d'une autre couleur. L'entraînement en réalité virtuelle était comparé à un entraînement vidéo et un entraînement en direct à l'aide de Skype. L'entraînement en réalité virtuelle a obtenu les meilleurs résultats.

Enfin, Bailenson et al. (2008) présente 2 études dans lesquelles les apprenants devaient apprendre des enchaînements de Tai-Chi. L'entraînement en réalité virtuelle était comparé à un entraînement vidéo. Dans la première expérience, les sujets du groupe RV voyaient à l'écran leur reconstruction positionnée à côté du professeur. Dans la deuxième expérience, le protocole était plus ou moins semblable, mais en ajoutant un effet miroir à la scène ce qui permettait de voir la scène sous un angle différent. La première expérience a été mieux évaluée d'un point de vu subjectif par les apprenants par rapport à l'entraînement vidéo, sans pour autant donner des résultats convaincants d'un point de vue objectif. La deuxième

expérience a, en revanche, permis de meilleurs progrès pour le groupe travaillant avec la réalité virtuelle.

Notre expérience se démarque sur plusieurs points des expériences citées précédemment. Pour commencer, les feedbacks que reçoivent les apprenants sont restreints, puisqu'ils ne voient à l'écran que la partie inférieure du corps, ce qui va leur permettre de traiter plus facilement l'information que si le corps est affiché en entier, et cible directement les articulations clés pour le mouvement. Ensuite, le squelette de l'apprenant est superposé avec celui de l'expert, ce qui jusqu'ici, a très peu été étudié. Enfin, une autre caractéristique est intéressante dans notre expérience : l'apprenant choisi lui-même la vitesse d'exécution du mouvement et c'est l'avatar de l'expert qui va s'adapter à l'apprenant, et non l'inverse comme c'est le cas dans la plupart des expériences. Soulignons encore l'évaluation subjective de notre technologie à l'aide d'un questionnaire, qui va nous permettre d'évaluer la pertinence de l'utilisation d'un environnement en réalité virtuelle dans le domaine du sport.

1.3 Questionnaire

Afin d'évaluer l'efficacité et l'utilisabilité du FVVI de manière subjective, nous avons soumis à chaque participant un questionnaire sur ladite technologie. Le questionnaire utilisé regroupe 7 sections différentes qui vont chacune chercher à évaluer l'opinion et le ressenti des participants. Les 7 sections sont les suivantes : charge mentale, engagement, présence, utilité, usabilité, satisfaction et acceptabilité. Ce questionnaire a été élaboré à l'aide de plusieurs articles (références données ci-après) traitant soit de l'élaboration d'un questionnaire, soit de la façon de valider un questionnaire, ou encore évaluant justement une technologie de réalité virtuelle de manière subjective grâce à des questionnaires. En étudiant ces différents articles et en y sélectionnant les différents points qui paraissaient les plus pertinents à l'évaluation subjective de la technologie, les 7 sections qui composent ce questionnaire se sont naturellement démarquées.

La partie « **charge mentale** » cherche à évaluer le travail mental que le sujet va devoir effectuer pour traiter les informations qu'il reçoit des différents stimuli, en l'occurrence ici en grande partie, des stimuli visuels. En calculant la charge mentale, le but est de voir, d'une part, si le sujet est suffisamment stimulé par la tâche qui lui est demandée afin qu'il soit motivé et, d'autre part, si le sujet n'est pas justement surchargé par les stimuli, ce qui aurait des conséquences négatives, à terme, sur l'apprentissage. L'objectif est d'estimer si le sujet a été capable de traiter les informations qu'il reçoit afin de pouvoir effectuer une réponse motrice

en adéquation avec les attentes des expérimentateurs, tout cela, sans engendrer de stress, de fatigue ou de découragement (Rubio et al., 2004).

La partie « **engagement** » cherche, elle, à savoir si le sujet s'est senti engagé dans la tâche, c'est-à-dire motivé et absorbé par ce qui lui était demandé, est-ce que l'utilisation de la technologie a excité sa curiosité et permis le maintien de sa concentration dans l'action. Elle est en lien avec la partie charge mentale puisque, comme discuté au paragraphe précédent, un nombre de stimuli trop importants et trop compliqués à traiter ou au contraire trop simples pourrait amener l'apprenant à « sortir » de la tâche, et à ne plus y être impliqué à 100 %. (Brockmyer et al., 2009)

La troisième section traite de la « **présence** » en réalité virtuelle. Dans la littérature, l'engagement et la présence étaient parfois confondus et parfois séparés. Certains articles traitent de manière similaire ou du moins très proche ces deux termes (e.g., Jelani, 2019 ; Labedan 2018) tandis que d'autre les séparent (e.g, Rubio, 2004 ; Venkatesh, 2003). Dans cette expérience, il a été décidé de les traiter de manière différenciée. Ainsi, sous le terme « présence », seront traitées les questions d'interactions directes avec la technologie, à savoir : est-ce que l'environnement en réalité virtuelle est suffisamment bien modélisé pour permettre une bonne interaction avec la technologie et est-ce que les sujets sont capables de rapidement s'identifier à l'avatar et d'en exploiter le maximum (Brockmyer et al., 2009).

La quatrième section traite de l'**utilité**. Dans cette section, le questionnaire se penche sur l'efficacité ressentie des apprenants. Les sujets jugent si cette technologie peut permettre une meilleure compréhension du mouvement qui engendre une amélioration du geste, et est-ce qu'il est donc pertinent de s'entraîner avec cette technologie. Il est également question de l'interaction apprenant-entraîneur qui est ici totalement différent de celle existante dans le cadre d'un entraînement classique. La question des feedbacks et de la relative maîtrise qu'ont les sujets sur ceux-ci en termes de temporalité est également traité. (Jelani et al., 2019)

Le quatrième point concerne l'**usabilité** de la technologie. Il est question ici de la facilité avec laquelle le sujet s'adapte à la technologie et de la facilité de compréhension et d'utilisation de son avatar ainsi que de la réactivité de l'environnement virtuel. La qualité graphique de l'environnement est également abordée. (Makransky et al., 2017)

L'avant-dernière section, la sixième donc, a trait à la **satisfaction** des sujets envers la technologie. Il est demandé ici aux sujets d'évaluer leur satisfaction vis-à-vis de la technologie par rapport à l'efficacité qu'elle a sur l'entraînement du Mawashi Geri. Il leur est demandé s'il pense que cet outil les a aidés à apprendre et si elle pourrait, hypothétiquement, accompagner de manière satisfaisante un entraînement en karaté. Il est également demandé

aux sujets de comparer cet entraînement en réalité virtuelle avec un entraînement plus classique, et de savoir dans quel mesure l'environnement en réalité virtuelle est plus ou moins efficace qu'un entraînement classique. (Jelani et al., 2019)

La dernière section de ce questionnaire concerne l'**acceptabilité** des sujets. Cette section demande aux sujets comment ils jugeraient l'utilisation de l'environnement en réalité virtuelle à plus grande échelle, dans d'autres activités sportives, et de savoir si eux-mêmes seraient prêt à rééditer l'expérience de la réalité virtuelle dans le cadre d'un apprentissage moteur. (Venkatesh et al., 2003)

Plusieurs articles abordent la notion de « flow ». Ce terme, utilisé entre autres dans le monde du sport et de la performance, définit un état dans lequel la personne se trouve totalement concentrée sur son activité, sans pour autant fournir un effort éprouvant, durant lequel la notion de plaisir est bien présente, et durant lequel l'efficacité atteint son paroxysme (Chen, 2007). C'est en particulier lorsque les athlètes se trouvent dans cette zone qu'ils sont capables de produire leurs meilleures performances (Bozec, 2017). Cette notion de flow revient régulièrement dans la bibliographie traitant de l'apprentissage en réalité virtuelle puisque, par définition, si le sujet atteint cette zone, son entraînement sera efficace. La figure ci-dessous présente bien les caractéristiques qui entrent en compte pour atteindre cet état de flow, qui découle d'une adéquation entre les compétences (abilities) de la personne et la difficulté du défi (challenge). Si la personne est hautement compétente, mais que le défi n'est pas intéressant, car trop facile, la personne aura tendance à tomber dans un état d'ennui (boredom). Si au contraire le défi imposé est trop exigeant en rapport des faibles compétences de la personne, elle aura alors tendance à être dans un état d'anxiété (anxiety). La zone de flow, qui se situe entre les deux, émerge ainsi d'un astucieux équilibre entre défi et compétence. Le défi à relever doit demander à la personne d'utiliser l'entier de ses capacités, afin d'être stimulé au maximum, et de ressentir un sentiment de compétence. On peut penser que, si les différentes sections du questionnaire sont bien notées par les participants, ils s'approcheront de cet état et pourront être performants.

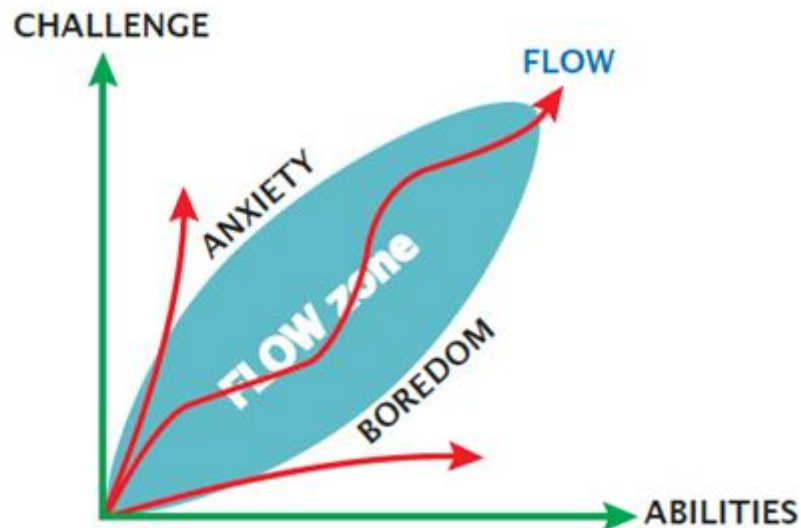


FIGURE 5. EXPLICATION DE L'ÉTAT DE FLOW (BOZEC, 2017, P.24)

Afin de construire au mieux ce questionnaire et d'y formuler les entrées de manière la plus adéquate possible, nous avons pris note des articles cités ci-dessus.

1.4 Objectifs du travail

Le premier objectif de ce travail est d'étudier si un entraînement de karaté dans un environnement en réalité virtuelle permet une amélioration de la performance. Nous étudions également l'emploi de différents types de feedbacks afin de déterminer lesquels sont les plus efficaces (4 groupes de feedbacks : ES-ES, ES-S, S-ES, S-S). Ces groupes déterminent si le participant reçoit seulement le feedback de son propre avatar, ou, en plus, celui de l'expert, et s'il les reçoit de manière simultanée ou différée (voir chapitre « méthode » pour plus de détails).

Le second objectif est d'obtenir une évaluation subjective de l'intérêt d'un tel apprentissage par les apprenants. A l'aide du questionnaire auxquels les sujets doivent répondre à la fin de l'expérience, nous allons chercher à évaluer la réception de la technologie chez les participants, et d'en mesurer son usabilité et sa capacité d'utilisation à plus ou moins large échelle.

Nous avons émis les hypothèses suivantes : les sujets étant répartis dans les groupes recevant à un moment un feedback (ES-ES, ES-S, S-ES), augmenteront leur performance significativement plus que le groupe contrôle qui ne reçoit pas le feedback de l'expert (S-S). Au sein même de ces groupes, il est possible que le groupe recevant le plus de feedback (ES-

ES) ait des difficultés à traiter toutes les informations et soit donc péjoré au niveau de leur performance, ce qui amènerait les groupes S-ES et ES-S vers une meilleure performance.

Concernant le questionnaire, nous pensons que la technologie sera bien accueillie par les participants et qu'ils la jugeront comme étant un bon complément, voir une bonne alternative, à une méthode d'entraînement plus classique.

2 Méthode

Pour notre expérience, nous avons fait passer 24 sujets (5 femmes, 19 hommes), tous droitiers, âgés entre 20 et 27 ans (moyenne : 23 ans), en bonne santé et n'ayant jamais pratiqué d'art martial. Tous les participants ont donné leur accord signé avant le début de l'expérience.

Le début du travail consistait à créer l'avatar de l'expert. Pour ce faire, nous avons pu compter sur la participation d'un expert en karaté. A l'aide de la technologie *Optitrack* et du programme informatique *Motive*, nous avons modélisé le squelette de l'expert et reconstruit le mouvement de Mawashi-Geri. Une fois cette étape effectuée, les participants étaient conviés les uns après les autres au laboratoire où ils enfilait une combinaison munie de 41 marqueurs.



FIGURE 6. COMBINAISON NOIR AVEC MARQUEURS

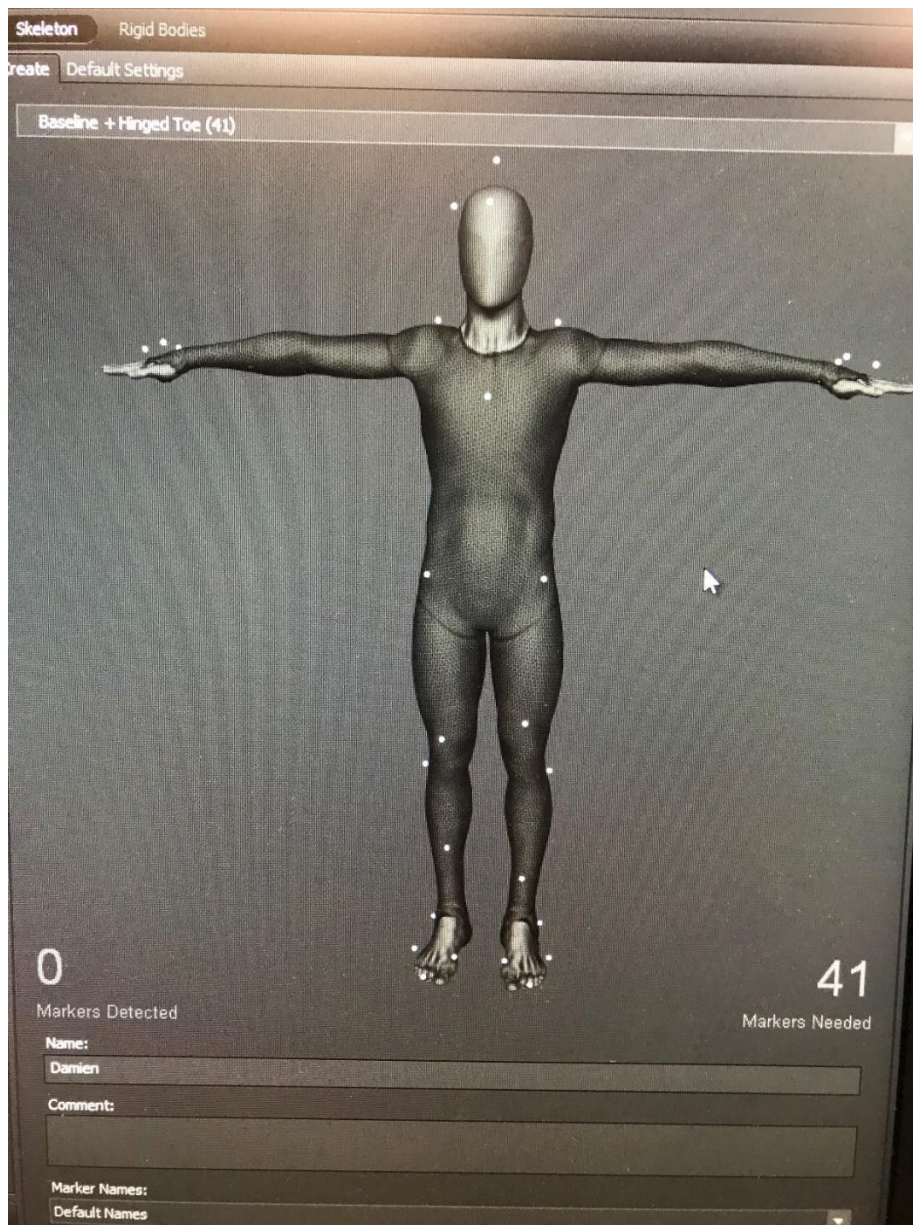


FIGURE 7. COMBINAISON NOIR AVEC MARQUEURS, LOGICIEL MOTIVE

Les sujets se plaçaient dans la salle de l'*Optitrack* dans laquelle se déroulait l'expérience. Nous modélisions à ce moment-là le squelette grâce au programme *Motive*. Les participants s'échauffaient ensuite durant 10 minutes, avant d'être instruits au Mawashi-Geri à l'aide d'une vidéo démontrant le coup de pied par un expert, accompagné d'instructions orales. Ils devaient ensuite effectuer un Mawashi-Geri (coup de pied circulaire) en ayant pour point de cible une balle en mousse accrochée devant eux à hauteur du ventre. Ils effectuaient, alors, à ce moment-là, 5-6 coups pour se familiariser avec le coup de pied. Débutait ensuite la phase d'enregistrement et d'entraînement selon le déroulement :

- Pré-test : consistait en une répétition de 10 mouvements que nous enregistrions.

- Phase d'entraînement : les participants recevaient les feedbacks à l'écran et pratiquaient le mouvement (3 séries de 8 coups).
- Post-test : nous enregistrons à nouveau 10 mouvements de Mawashi-Geri.

Durant la phase d'entraînement, les participants voyaient à l'écran le bas de leur propre squelette (hanche et jambes en *fil de fer* rouge) en direct. Les participants recevaient un feedback visuel simultané, donc pendant l'exécution même du mouvement, puis en *replay*, un feedback visuel différé du coup qu'ils venaient d'exécuter. L'expérience comportait 4 groupes différents selon les quatre jeux de feedback. Les participants étaient répartis de manière égale et aléatoire dans les 4 groupes :

- Groupe E-ES : le sujet voit seulement son avatar en simultané, puis son avatar et celui de l'expert en différé.
- Groupe ES-S : le sujet voit son avatar et celui de l'expert en simultané, puis son avatar seulement en différé.
- Groupe ES-ES : le sujet voit son avatar et celui de l'expert en simultané ainsi qu'en différé.
- Groupe S-S (groupe contrôle) : le sujet voit seulement son avatar en simultané ainsi qu'en différé, et n'a donc pas la possibilité de se comparer à l'expert.

Grâce aux feedbacks qu'ils reçoivent, les apprenants doivent chercher à imiter au mieux l'expert. Durant la phase d'entraînement, ils pouvaient choisir la vitesse d'exécution du mouvement puisque l'expert s'adaptait en temps et en espace au coup des sujets. Une ligne pointillée verte dessinait le tracé du pied de l'expert du point de départ jusqu'à l'impact de la cible, qui était, elle, représentée par une boule bleue. Cette ligne pointillée servait donc également de feedback aux groupes qui disposaient de l'expert comme feedback (groupe ES).

A la fin de l'enregistrement du Post-test, les sujets devaient remplir un questionnaire anonyme cherchant à évaluer de manière subjective la technologie. L'expérience durait en tout entre 45 et 50 minutes.

2.1 Détail du matériel

Pour créer le squelette de l'expert et celui des participants nous avons utilisé le système *Optitrack* avec 16 caméras qui quadrillaient la salle de 9 mètres de long sur 6 mètres de large. Les participants étaient équipés de 41 marqueurs positionnés précisément et stratégiquement sur les différentes articulations, ainsi que sur la tête. Pour créer le mouvement de l'expert ainsi qu'analyser les données des participants, nous avons utilisé le logiciel *caplab*.

Comme déjà abordé plus haut, dans le but d'éviter une surcharge au niveau du traitement de l'information chez les participants, il a été choisi de n'afficher que les membres des pieds aux hanches sur l'écran. Ceci permet aux participants de se concentrer sur l'essentiel du mouvement. Ils bénéficiaient d'une vue à la troisième personne. La caméra virtuelle était placée à l'arrière des sujets, légèrement surélevée. Au début de chaque mouvement, le squelette du sujet était aligné à celui de l'expert.

2.1.1 Post-processing. Afin de mesurer la différence de performance entre les pré et post-tests, et de pouvoir conclure à une amélioration de la performance, les données enregistrées ont été comparées à celles de l'expert. Une comparaison spatiale des différentes articulations a été faite et le but était donc de voir si les positions des articulations et des membres étaient meilleures, c'est-à-dire plus proche de celles de l'expert, lors du post-test que lors du pré-test.

2.1.2 Analyse statistique. Pour l'analyse des performances des sujets, nous avons utilisé un test F de Welch (pour des données qui ne respectent pas l'homogénéité des variances) afin de voir si le niveau des différents groupes était homogène. Nous avons ensuite utilisé un Wilcoxon test (données non-paramétriques) pour voir si les performances de tous les groupes confondus s'étaient améliorées. Nous avons ensuite utilisé soit un Wilcoxon test (données non-paramétriques), soit un test t de Student (données paramétriques) afin de voir, pour chaque groupe, si la performance s'était améliorée. Puis, nous avons enfin utilisé un test ANOVA Kruskal-Wallis (test utilisé pour des données qui ne suivent pas une distribution normale) afin de voir s'il y avait une différence significative entre le changement de performance de chaque groupe.

Concernant l'analyse des questionnaires, pour chaque item nous avons utilisé un test ANOVA Kruskal-Wallis, suivi d'un test POST-HOC, à savoir un test t en utilisant une comparaison appariée et en appliquant la méthode d'ajustement de Bonferroni.

Pour tous les tests effectués, les résultats sont jugés significatifs si $p\text{-value} < 0.05$.

3 Résultats

Dans cette section, nous allons analyser dans un premier temps les résultats Pré et Post test des mouvements effectués, qui correspondent donc à une évaluation objective de notre expérience, puis, dans un deuxième temps, nous analyserons les résultats des questionnaires afin d'avoir une évaluation subjective de la technologie de réalité virtuelle.

Afin de savoir si les participants s'étaient améliorés durant la séance d'entraînement du Mawashi-Geri, nous avons analysé et comparé les performances des sujets lors des pré-tests et des post-tests. Les données relevées correspondent à la position dans l'espace des différentes articulations et membres des participants. Ces positions ont été comparées avec celles de l'expert, le but étant que lors du Post-test, les performances se rapprochent au maximum de ce qu'a fait l'expert, par rapport au pré test.

3.1 Evaluation objective

Nous avons commencé par analyser les performances des 4 groupes en Pré-test afin de voir s'il y avait une différence de niveau avant même le début de l'expérience. Le test F de Welch, test utilisé lorsque l'homogénéité des variances n'est pas respectée, a montré qu'il n'y avait pas de différence de niveau entre les 4 groupes puisque les différences n'étaient pas significatives ($F(3) = 1.47, p = 0.277$). Ce point nous informe que les sujets sont répartis par niveau de manière homogène entre les groupes.

Nous avons ensuite cherché à voir si, tous groupes confondus, il y avait une amélioration de la performance. Nous avons mené un Wilcoxon test, utilisé pour des données non-paramétriques, et nous avons découvert que la performance générale des 24 sujets s'était significativement améliorée. L'analyse de la performance a montré qu'en Pré-test, les participants étaient éloignés de 70,92 cm, tandis qu'après entraînement, ils n'étaient plus qu'éloignés de 65,46 cm, à savoir une amélioration de la performance générale de 5,46 centimètres ($p = 0.010, V = 62$).

Nous avons ensuite procédé à l'analyse des performances groupe par groupe à l'aide d'un Wilcoxon test pour le groupe ES-ES, et à l'aide d'un test t pour les trois autres groupes. Le groupe contrôle (S-S) est passé de 75.17 cm à 71.31 cm, sans que cela soit significatif ($t(5) = -1.11, p = 0.314$). Le groupe ES-ES a vu sa performance passer de 62.65 cm à 59,72 cm, une nouvelle fois sans être significatif ($p = 0.562, V = 7$). Le groupe ES-S est passé de 67.86 cm à 63.56 cm, ce qui était également non-significatif ($t(5) = -1.10, p = 0.320$). Enfin, le groupe S-ES a vu sa performance s'améliorer de 10.76 cm en passant de 78.02 cm à 67.26 cm, et cette

amélioration était, cette fois, significative ($t(5) = -4.30, p = 0.007$). Ci-dessous, le graphique des résultats.

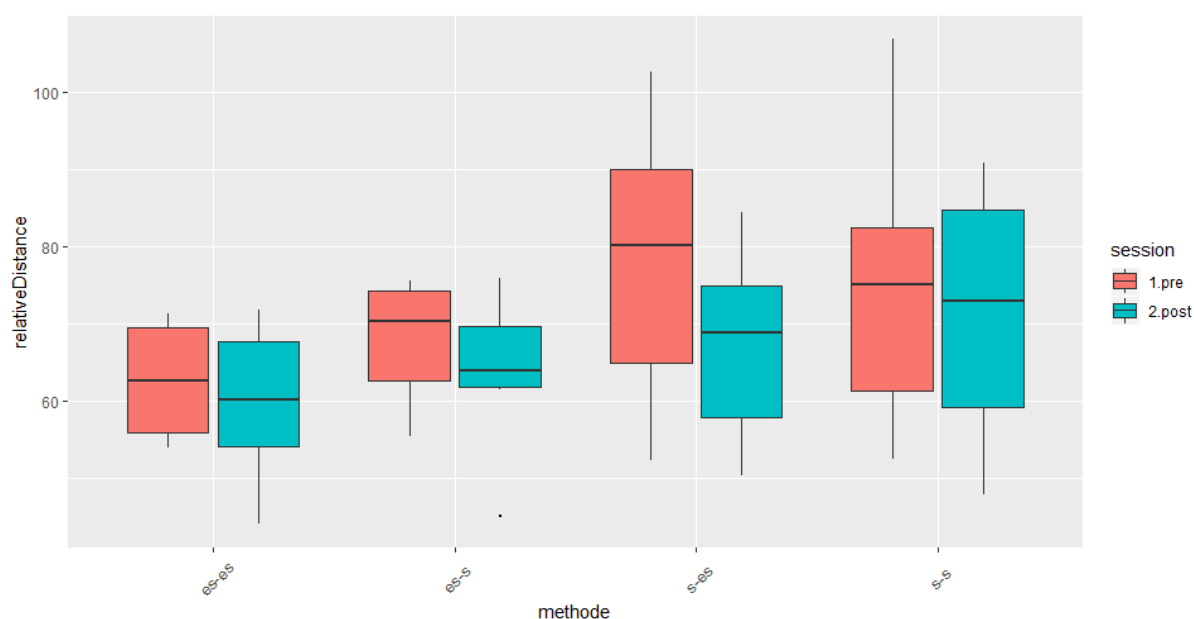


FIGURE 10. PERFORMANCE PRÉ/POST POUR CHAQUE GROUPE, EN CENTIMÈTRES D'ERREUR PAR RAPPORT À L'EXPERT, LA PERFORMANCE DE L'EXPERT ÉTANT À 0.

Nous avons enfin comparé les améliorations de chaque groupe entre elles à l'aide d'un test ANOVA de Kruskal-Wallis, test utilisé pour des données qui ne suivent pas une distribution normale, et nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les groupes (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 3.51, p = 0.319$). L'effet de l'amélioration n'est pas suffisamment fort pour qu'il y ait une différence significative entre les groupes.

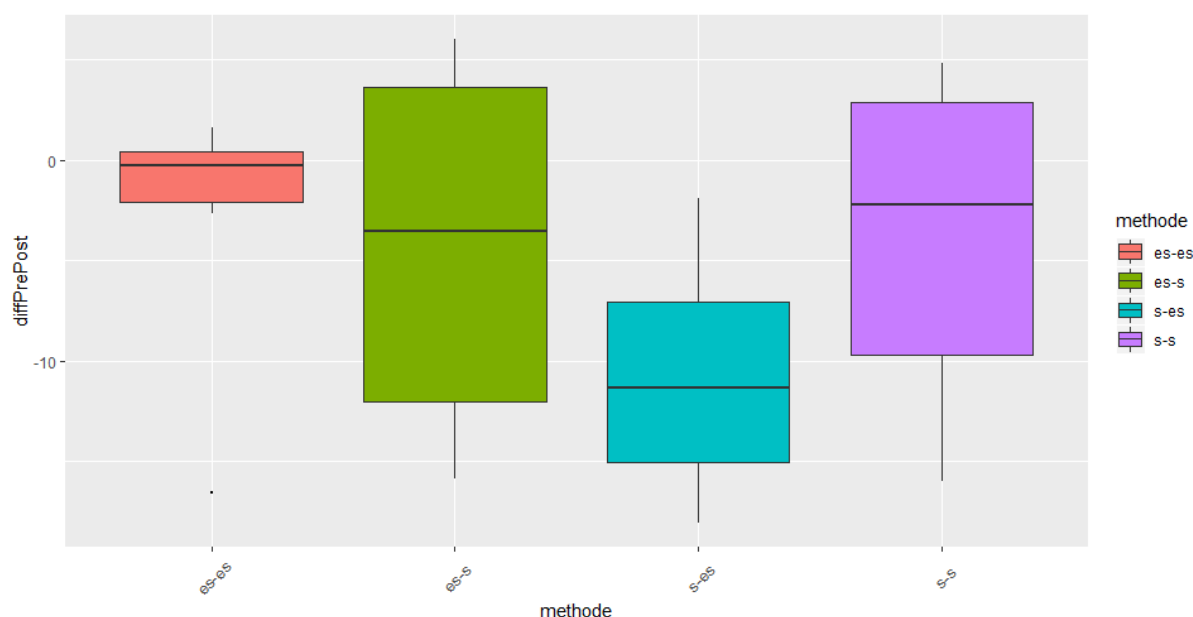


FIGURE 11. DIMINUTION/AUGMENTATION DE L'ERREUR EN CENTIMÈTRES AU POST TEST PAR RAPPORT À L'EXPERT, LE 0 CORRESPONDANT À LA PERFORMANCE DU PRÉ TEST. AU-DESSOUS DE 0 = DIMINUTION DE L'ERREUR, EN DESSUS DE 0 = AUGMENTATION DE L'ERREUR.

3.2 Evaluation subjective

Les résultats du questionnaire sont reportés dans le tableau ci-dessous. Nous avons fait les moyennes de chaque section en calculant la moyenne de chaque item et en faisant la moyenne totale. Le questionnaire comportait 35 questions auxquelles les sujets devaient répondre sur une échelle de Likert de 1 à 5, la note 1 étant « pas du tout d'accord », et la note 5 étant « tout à fait d'accord ». Dans l'ordre décroissant, l'acceptabilité obtenait une moyenne de 4.56, la présence 4.42, l'engagement 4.27, l'usabilité 4.23, la satisfaction 4.07, l'utilité 3.88 et la charge mentale 2.93. Les scores d'un des items de la section « usabilité » a été inversé car la phrase était tournée à la négative (item E3). L'échelle est à interprétée comme suit :

- Un score entre 1.0 et 1.99 : pas du tout d'accord
- Un score entre 2.0 et 2.99 : pas d'accord
- Un score entre 3.0 et 3.99 : d'accord
- Un score entre 4.0 et 5.00 : tout à fait d'accord

TABEAU 1

MOYENNE POUR CHAQUE SECTION DU QUESTIONNAIRE SUR UNE ÉCHELLE DE LIKERT DE 1-5

Sections	Moyenne
Charge mentale	2.93

Engagement	4.27
Présence	4.42
Utilité	3.88
Usabilité	4.23
Satisfaction	4.07
Acceptabilité	4.56

NOTE. LES PARTICIPANTS ONT RÉPONDU AUX 7 SECTIONS DU QUESTIONNAIRE. ICI, LES MOYENNES DE TOUTES LES RÉPONSES POUR CHAQUE SECTION.

En analysant les items plus en détail et en les comparant groupe par groupe, nous avons pu relever quelques différences intéressantes. Tous les items ont été analysés à l'aide d'un test ANOVA de Kruskal-Wallis, test utilisé lorsque les données ne sont pas distribuées normalement, suivi d'un test POST-HOC, à savoir, comme dit plus haut, un test *t* en utilisant une comparaison appariée et en appliquant la méthode d'ajustement de Bonferroni.

L'analyse de l'item A4, « J'ai dû considérablement me concentrer pour accomplir l'entraînement » (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 7.70, p = 0.052$), a démontré qu'une différence très proche d'être significative apparaissait entre les groupes. Le test POST-HOC a démontré que cette différence était le plus marqué entre le groupe S-S et le groupe S-ES ($p = 0.020$).

TABLEAU 2
COMPARAISON ITEM A4 ENTRE CHAQUE GROUPE EN TEST *T*

	ES-ES	ES-S	S-ES
ES-S	1.000	-	-
S-ES	0.670	0.670	-
S-S	0.670	0.670	0.020

NOTE. TEST POST-HOC (TEST *T*, COMPARAISON APPARIÉE, MÉTHODE D'AJUSTEMENT DE BONFERRONI) APRÈS LE TEST ANOVA KRUSKAL-WALLIS. NOUS COMPARONS ICI LA DIFFÉRENCE DE CHAQUE GROUPE PAR PAIRE. SIGNIFICATIF SI $p < 0.05$.

La moyenne pour l'item A4 était de 2.00 (pas d'accord) pour le groupe S-S, et de 3.66 (d'accord) pour le groupe S-ES.

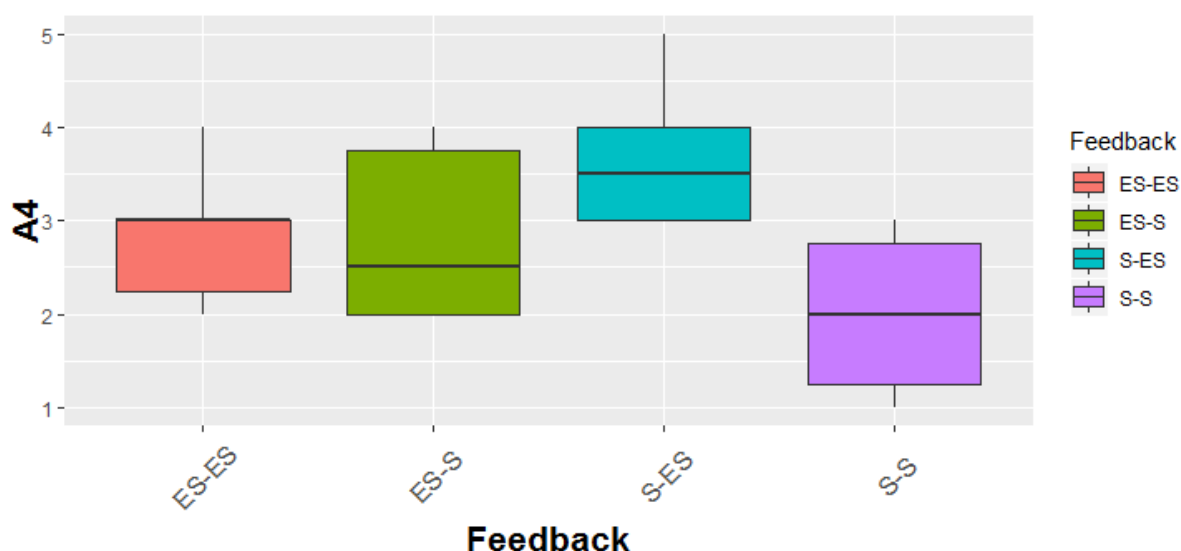


FIGURE 12. RÉSULTATS DE L'ITEM A4 DU QUESTIONNAIRE POUR CHAQUE GROUPE. ECHELLE DE LIKERT DE 1 À 5.

L'item B4, « L'utilisation de la réalité virtuelle m'a aidé à bien comprendre le geste à effectuer » (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 7.21, p = 0.065$), s'est également rapproché de la valeur significative sans pour autant l'atteindre. Ce test indique tout de même une tendance. Le test POST-HOC a démontré une différence entre les groupes ES-ES et S-S ($p = 0.046$)

TABEAU 3
COMPARAISON ITEM B4 ENTRE CHAQUE GROUPE EN TEST T

	ES-ES	ES-S	S-ES
ES-S	0.925	-	-
S-ES	1.000	1.000	-
S-S	0.046	0.925	0.308

NOTE. TEST POST-HOC (TEST T, COMPARAISON APPARIÉE, MÉTHODE D'AJUSTEMENT DE BONFERRONI) APRÈS LE TEST ANOVA KRUSKAL-WALLIS. NOUS COMPARONS ICI LA DIFFÉRENCE DE CHAQUE GROUPE PAR PAIRE. SIGNIFICATIF SI $P < 0.05$.

La moyenne du groupe ES-ES pour l'item B4 s'élevait à 4.66 (tout à fait d'accord) tandis que celle du groupe S-S était de 3.00 (neutre).

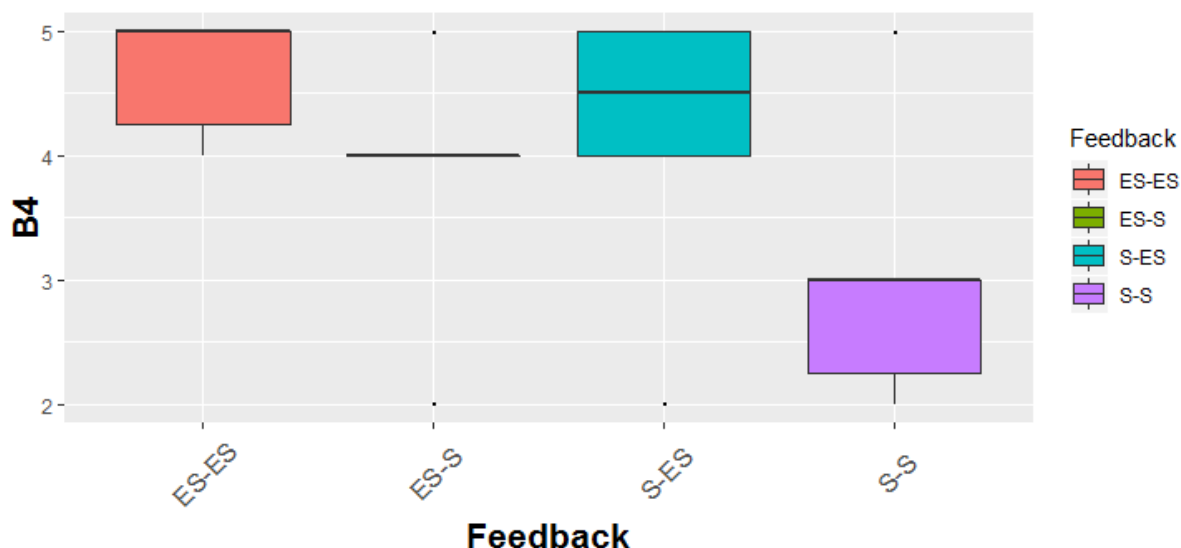


FIGURE 13. RÉSULTATS DE L'ITEM A4 DU QUESTIONNAIRE POUR CHAQUE GROUPE. ECHELLE DE LIKERT DE 1 À 5.

Pour l'item C4, « Je me suis senti/e présent/e et concentré/e dans l'entraînement » (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 8.62, p = 0.034$), l'analyse a montré qu'il y avait des différences significatives entre les groupes, et selon le test POST-HOC particulièrement entre le groupe ES-ES et le groupe ES-S, ainsi qu'entre le groupe ES-S et S-ES ($p = 0.055$).

TABEAU 4
COMPARAISON ITEM C4 ENTRE CHAQUE GROUPE EN TEST T

	ES-ES	ES-S	S-ES
ES-S	0.055	-	-
S-ES	1.000	0.055	-
S-S	0.592	1.000	0.592

NOTE. TEST POST-HOC (TEST T, COMPARAISON APPARIÉE, MÉTHODE D'AJUSTEMENT DE BONFERRONI) APRÈS LE TEST ANOVA KRUSKAL-WALLIS. NOUS COMPARONS ICI LA DIFFÉRENCE DE CHAQUE GROUPE PAR PAIRE. SIGNIFICATIF SI $P < 0.05$.

La moyenne du groupe ES-ES était de 4.83 (tout à fait d'accord), celle du groupe ES-S 4 (à cheval entre d'accord et tout à fait d'accord), et celle du groupe S-ES, 4.83 (tout à fait d'accord).

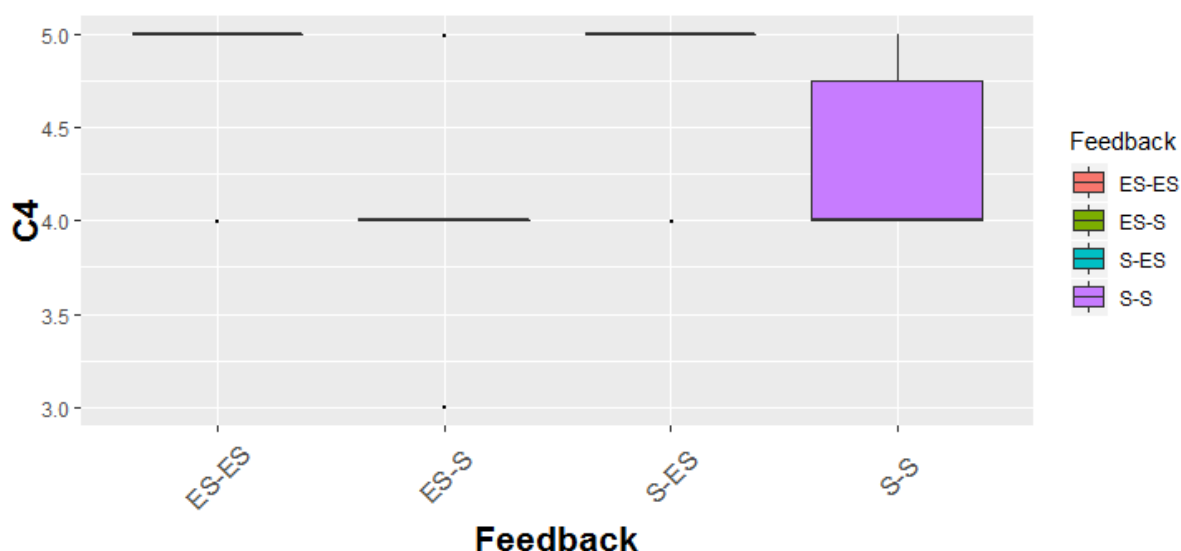


FIGURE 14. RÉSULTATS DE L'ITEM C4 DU QUESTIONNAIRE POUR CHAQUE GROUPE. ECHELLE DE LIKERT DE 1 À 5.

L'item D1, « En utilisant la réalité virtuelle, je suis capable de perfectionner mon geste » (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 10.86, p = 0.012$), a montré une différence significative très claire entre les groupes, ceci particulièrement entre le groupe ES-ES et le groupe S-S ($p = 0.003$).

TABEAU 5
COMPARAISON ITEM D1 ENTRE CHAQUE GROUPE EN TEST T

	ES-ES	ES-S	S-ES
ES-S	0.836	-	-
S-ES	0.110	1.000	-
S-S	0.003	0.110	0.836

NOTE. TEST POST-HOC (TEST T, COMPARAISON APPARIÉE, MÉTHODE D'AJUSTEMENT DE BONFERRONI) APRÈS LE TEST ANOVA KRUSKAL-WALLIS. NOUS COMPARONS ICI LA DIFFÉRENCE DE CHAQUE GROUPE PAR PAIRE. SIGNIFICATIF SI $p < 0.05$.

La moyenne des 2 groupes s'élevait, pour le groupe S-S, à 3.33 (d'accord), et pour le groupe ES-ES, à 4.67 (tout à fait d'accord).

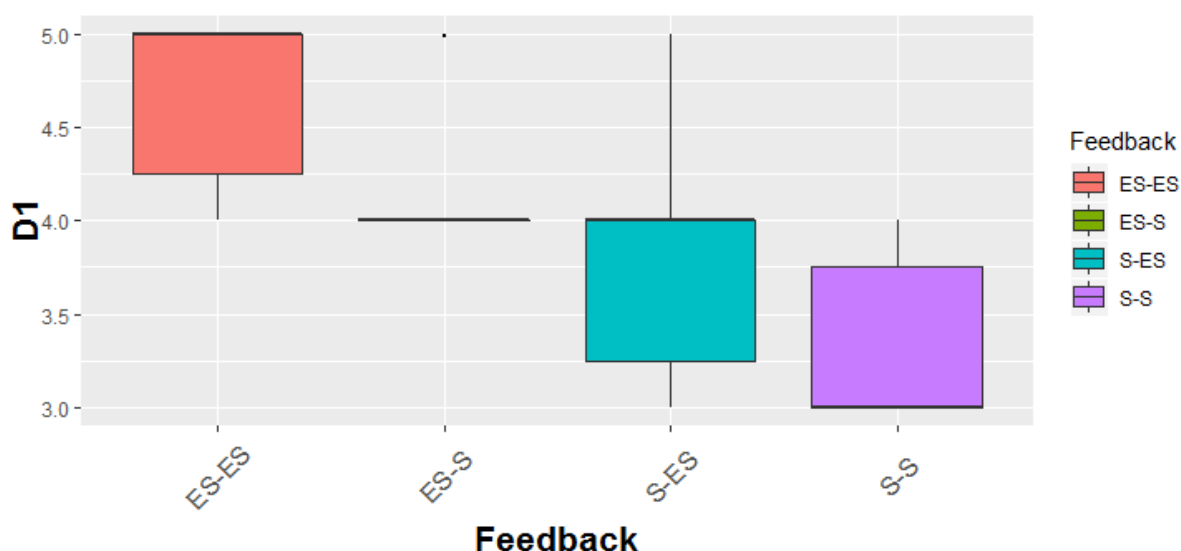


FIGURE 15. RÉSULTATS DE L'ITEM D1 DU QUESTIONNAIRE POUR CHAQUE GROUPE. ECHELLE DE LIKERT DE 1 À 5.

Et enfin, pour l'item F6, « Je pense avoir amélioré mon geste plus facilement qu'avec une méthode d'apprentissage classique » (Kruskal-Wallis $\chi^2(3) = 7.36$, $p = 0.061$), sans être significatif, donne également une certaine tendance. Une certaine différence apparaissait à la fois entre le groupe ES-ES et ES-S, ainsi qu'entre le groupe ES-ES et S-S ($p = 0.130$).

TABLEAU 6
COMPARAISON ITEM F6 ENTRE CHAQUE GROUPE EN TEST T

	ES-ES	ES-S	S-ES
ES-S	0.130	-	-
S-ES	1.000	0.660	-
S-S	0.130	1.000	0.660

NOTE. TEST POST-HOC (TEST T, COMPARAISON APPARIÉE, MÉTHODE D'AJUSTEMENT DE BONFERRONI) APRÈS LE TEST ANOVA KRUSKAL-WALLIS. NOUS COMPARONS ICI LA DIFFÉRENCE DE CHAQUE GROUPE PAR PAIRE. SIGNIFICATIF SI $p < 0.05$.

La moyenne du groupe ES-ES s'élevait à 4.5 (tout à fait d'accord), celle du groupe S-S à 3 (neutre), avec, cependant, beaucoup de variance, et la moyenne du groupe ES-S à 3 également (neutre).

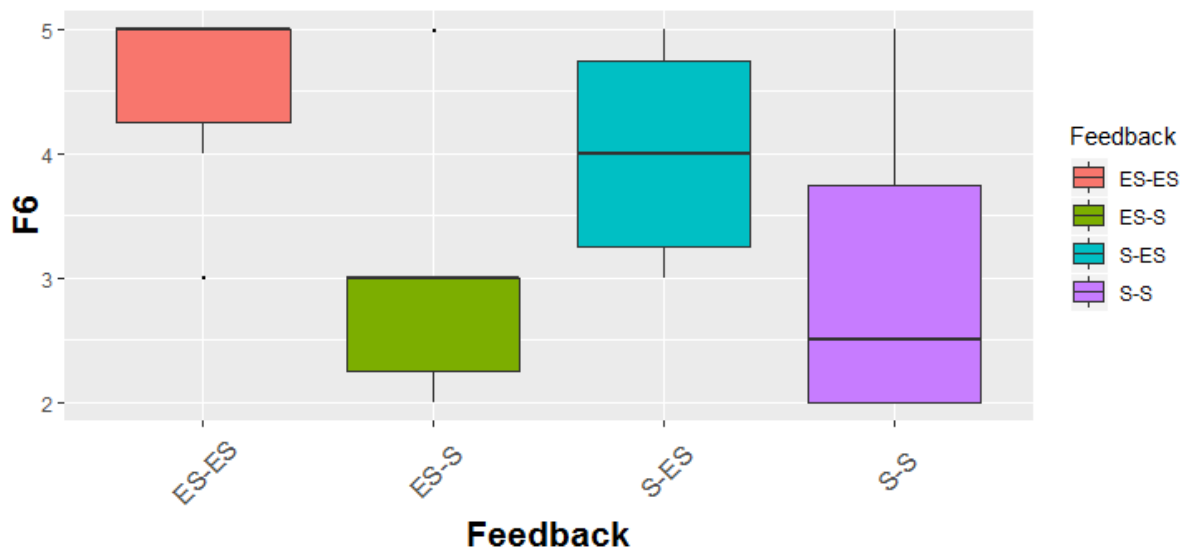


FIGURE 16. RÉSULTATS DE L'ITEM F6 DU QUESTIONNAIRE POUR CHAQUE GROUPE. ECHELLE DE LIKERT DE 1 À 5.

4 Discussion

Dans cette section, nous allons analyser les résultats les plus pertinents ressortis au point précédent en séparant l'analyse quantitative et l'analyse qualitative.

4.1 Analyse quantitative

Pour commencer, il est important de relever que, selon les analyses, le niveau des groupes était homogène. En effet, les performances au début de l'expérience, en Pré-test donc, ne sont significativement pas différentes entre elles. Ceci est important puisqu'une différence, dès le début de l'expérience, entre les groupes, rendraient la comparaison inter-groupe compliquée et peu fiable.

D'un point de vue générale, il est intéressant de relever qu'en mélangeant les résultats, la performance des participants s'améliore de manière significative ($p = 0.010$). Ces résultats attestent donc que l'entraînement en réalité virtuelle que nous avons mis sur pied pour entraîner un coup de pied circulaire (Mawashi-Geri) est efficace, ceci tous feedbacks confondus. Les débutants que nous avons pris pour l'expérience ont donc réduit de 5 cm sur l'ensemble des articulations du corps, en moyenne pour chaque posture du mouvement, la distance d'erreur qui les séparait du mouvement « parfait » de l'expert, pour passer de 70.92 cm à 65.46 cm. En prenant en compte le temps relativement court d'entraînement (les sujets venaient une seule fois en laboratoire et s'entraînaient entre 30 et 40 minutes) et le faible nombre de sujets par groupe, ces résultats sont encourageants et laisse penser que la technologie utilisée pourrait être efficace en comparaison du groupe contrôle et donnerait des résultats assez rapidement.

En regardant les résultats groupe par groupe, on s'aperçoit que tous les groupes s'améliorent de plusieurs centimètres. Cependant, seul le groupe S-ES présente une amélioration jugée significative ($p = 0.007$). Si l'on compare l'amélioration de ce groupe, qui est de 10.76 cm, avec le groupe recevant le plus de feedback, à savoir le groupe ES-ES dont l'amélioration non-significative était de 2.93 cm ($p = 0.562$), en passant de 62.65 à 59.72, on se rend compte que la différence en termes de centimètre est assez conséquente. Pour expliquer ceci, il est nécessaire de faire référence au travail de Salmoni, Schmidt et Walter (1984). Comme nous l'avons déjà souligné plus haut dans notre travail, lorsqu'une personne apprend un nouveau geste, il est nécessaire pour qu'il y ait apprentissage que cette personne reçoive des feedbacks, cependant, le fait de fournir trop de feedbacks à l'apprenant peut influencer négativement l'apprentissage. En effet, il semblerait qu'en recevant trop de feedbacks, l'apprenant ait d'une

part du mal à traiter l'information de manière efficace, et, d'autre part, qu'il en devienne dépendant (Miles et al., 2012). Il est tout à fait possible que cette théorie explique cette différence d'apprentissage plus ou moins conséquente entre le groupe ES-ES et le groupe S-ES. En effet, le groupe ES-ES reçoit le feedback de l'expert pendant l'exécution du mouvement ainsi qu'en différé. C'est donc le groupe recevant le plus de feedbacks. Si, à priori, le fait de recevoir un maximum de feedback peut paraître bénéfique pour l'apprentissage, il semble que dans notre cas, l'analyse des résultats confirme les théories avancées par ces deux études : Salmoni et al. 1984 et Miles et al. 2012. Les sujets du groupe ES-ES ont pu être submergés par l'abondance de feedbacks et en devenir dépendant, ce qui est bien sûr problématique puisque, lors de l'enregistrement des Post-tests, les sujets ne recevaient aucun feedback à l'écran. A ce sujet, 2 participants du groupe ES-ES m'ont confié, de manière spontanée, qu'à la fin de la partie d'entraînement ils se sentaient de plus en plus performants et arrivaient de plus en plus facilement à s'aligner avec l'expert, mais que, en revanche, lorsque l'on enregistrait les Post-tests et qu'à ce moment-là les feedbacks n'étaient pas diffusés à l'écran, ils se sentaient « en manque de repères » et avaient donc de la peine à se souvenir du geste juste. Ceci va totalement dans le sens de ce qui est dit ici. Les sujets de ce groupe, durant la phase d'entraînement, avaient droit à de nombreux repères lors de l'exécution du mouvement, dès le début du geste (position des hanches au départ, position du pied d'appui, position du pied de frappe au départ), et ce, jusqu'à la fin du geste (trajet du pied, élévation du genou, etc.). Ils ont donc pu développer une certaine dépendance à ces repères-là, qui leur permettaient avant même l'exécution du coup de pied d'avoir une sorte de rituel très précis de la position à adopter. N'ayant plus ces repères en Post-test, dès le début du geste, les participants se sentaient perdus. Les sujets du groupe S-ES ne disposaient eux, en revanche, pas du feedback de l'expert durant l'exécution, ce qui fait qu'ils étaient plus indépendants durant l'exécution du geste et qu'ils ont dû mettre en place, par eux-mêmes, un moyen de connaître la bonne position (feedbacks proprioceptifs). Ceci leur permettait de ne faire attention qu'aux feedbacks intrinsèques lors de l'exécution du geste, avant de pouvoir traiter et intégrer en replay les feedbacks apportés par la diffusion de l'expert.

En analysant les résultats du groupe ES-S, qui ne percevait le feedback de l'expert qu'en simultané, mais qui ne bénéficiait que de son propre avatar en différé, nous nous apercevons que c'est le second groupe présentant la plus grande amélioration, à savoir une réduction de l'erreur de 4.30 cm (non-significatif : $p = 0.320$). Les résultats pour ce groupe n'étant pas significatif, ce que nous allons avancer ici est à discuter, mais encore une fois, il est possible

de penser que ce groupe, qui ne bénéficiait pas du maximum de feedbacks possible, ai pu en profiter au maximum sans en devenir dépendant.

Concernant l'analyse de l'amélioration de chaque groupe entre eux, aucune valeur significative n'est apparue. Ceci est certainement explicable du fait que trop peu de sujets étaient répartis dans chaque groupe. Une analyse en t-test avec des groupes plus conséquents aurait certainement donnée des résultats.

4.2 Analyse qualitative

En analysant les moyennes obtenues pour chaque section du questionnaire, on se rend rapidement compte que la technologie a été globalement très bien notée. La section « acceptabilité » a été la mieux notée puisque la moyenne s'élève à 4.56, ce qui démontre une volonté d'utiliser la technologie, 5 étant la note maximale. Deux des items de cette section, qui portaient sur le plaisir à apprendre avec la réalité virtuelle ainsi que sur le côté « agréable » de travailler avec la technologie ont obtenu une moyenne de 4.67 (G2 et G3), ce qui démontre à quel point les participants ont trouvé intéressant et agréable de travailler avec cette technologie dans le domaine de l'apprentissage moteur.

La section « présence » a obtenu un score moyen de 4.42, et est, de ce fait, la 2^{ème} section la mieux notée. Cette section traitait principalement de l'interaction avec la réalité virtuelle et du sentiment de présence, d'implication dans l'entraînement, afin de savoir si les sujets se laissaient « prendre » l'environnement en réalité virtuelle. Là aussi, la note nous montre que la technologie permet une implication dans l'entraînement à travers la technologie.

La prochaine section était celle de « l'engagement », ayant une moyenne de 4.27. A nouveau la note traduit la curiosité et la motivation des participants par rapport à la réalité virtuelle.

La section « usabilité » a obtenu la note moyenne de 4.23. L'item E3 de cette section a obtenu la note la plus haute tout Items confondus, à savoir la note de 4.71. Cet item traitait de la qualité graphique de notre environnement en réalité virtuelle, et prouve donc que la qualité graphique est suffisante au regard des sujet pour un entraînement comme le nôtre. Ceci confirme ce que Vignais et al. (2010) avançaient dans leur étude, à savoir que des graphismes relativement simples permettent d'obtenir des résultats. Les participants s'identifient donc bien à l'avatar, même s'il n'est pas parfaitement identique à un corps humain.

L'item « satisfaction » a obtenu, lui, une moyenne de 4.07. On reste encore ici dans la tranche « tout à fait d'accord ». Cette section traitait de la satisfaction des participants par rapport à la technologie en réalité virtuelle dans un but d'apprentissage moteur. Là encore, les participants

étaient satisfaits de la technologie, en témoigne la note moyenne de 4.63 pour l'item F4, « Je pense que la réalité virtuelle est un bon outil d'apprentissage ».

L'item « utilité » obtient une moyenne de 3.88. Cette note démontre également l'évaluation de l'intérêt porté par les sujets. Tentons toutefois d'expliquer l'écart à la note maximale de 5. Sur les 7 items composant la section « utilité », 5 d'entre eux ont obtenu une note moyenne égale ou supérieure à 4, un item a obtenu la note de 3.83, et le dernier item est descendu, lui, à 2.17. Parmi les items les mieux notés, nous pouvons, entre autres, relever les items D4 et D5, qui traitaient de la possibilité des participants à gérer la vitesse du feedback, et qui ont obtenu, respectivement les notes suivantes : 4.21 et 4.08. En revanche, l'item D6, « Cette application de réalité virtuelle est plus utile qu'un entraînement classique avec un entraîneur », a tiré la moyenne vers le bas avec son score moyen de 2.17. Nous pouvons donc comprendre que, bien que les participants trouvaient utile et intéressant d'apprendre avec la réalité virtuelle, ils n'étaient en revanche pas d'accord pour dire que cette technologie pouvait avantageusement remplacer un entraînement classique avec un entraîneur. La technologie en réalité virtuelle se profile donc comme un bon complément à l'apprentissage classique, sans en être un substitut, en témoigne l'item D2, « Selon moi, l'utilisation de la réalité virtuelle est un bon complément pour améliorer ma performance en plus d'un entraînement classique », qui a obtenu lui, avec la note de 4.67, la meilleure moyenne de cette section.

Enfin, la dernière section, « charge mentale », a obtenu la moyenne la plus basse avec 2.93. Cette note, qui correspond à une note plus ou moins neutre (3.00), est en réalité positive puisque, dans cette section-là, nous voulions voir si le travail cognitif à effectuer par les participants était trop élevé. Avec cette moyenne neutre, nous pouvons comprendre que les participants n'ont pas été surchargés cognitivement mais, non moins important, ils ont tout de même dû fournir un certain travail mental, ce qui est bien sûr primordial pour accomplir une bonne performance et garder les participants motivés. Ceci renvoie à la notion de *flow* traité dans la partie sur le questionnaire.

L'analyse de l'item A4 ($p = 0.052$), « J'ai dû considérablement me concentrer pour accomplir l'entraînement », nous montre que le groupe contrôle S-S, avec une moyenne de 2.00, n'as pas dû accomplir un important travail cognitif, tandis que le groupe S-ES (POST-HOC entre les 2 groupes, $p = 0.02$), avec une moyenne de 3.66, a été le groupe à fournir le plus grand travail cognitif. Nous pouvons éventuellement comprendre que, pour accomplir une bonne performance, il est bon d'être passablement stimulé cognitivement, le groupe S-ES étant le seul groupe à avoir démontré une amélioration significative de sa performance.

L'item B4, « L'utilisation de la réalité virtuelle m'a aidé à bien comprendre le geste à effectuer », bien que non significative ($p = 0.065$), montre cependant une tendance assez logique, à savoir que le groupe S-S, ne bénéficiant donc pas du feedback de l'expert, a donné une note de 3.00 à l'item B4 tandis que le groupe ES-ES lui a donné une note de 4.66. Ceci est facilement compréhensible puisque les participants du groupe S-S n'avaient aucun feedback autre que leur propre avatar.

L'item C4, « Je me suis senti/e présent/e et concentré/e dans l'entraînement », a lui démontré des différences significatives entre les groupes ($p = 0.034$). En effet, les groupes S-ES et ES-ES se sont sentis plus présents et concentrés que les groupes ES-S et S-S ($p = 0.055$, très proche d'être significatif). La différence avec le groupe S-S s'explique facilement, puisque ce groupe recevait les feedbacks les plus légers et manquait donc en quelque sorte de stimulation. Le groupe ES-S ne recevait lui de feedback de l'expert qu'en simultané, ce qui, en différé, pouvait manquer à nouveau de stimulation, et donc « sortir » les participants de l'entraînement.

L'item D1, « En utilisant la réalité virtuelle, je suis capable de perfectionner mon geste », a montré la différence significative la plus claire ($p = 0.012$), entre les groupes S-S et ES-ES ($p = 0.003$). Le groupe S-S a donné une note moyenne de 3.33, tandis que le groupe ES-ES a donné une note moyenne de 4.67. Le groupe ES-ES, groupe à avoir reçu la plus grande somme de feedbacks, a été le groupe à avoir ressenti la plus grande capacité à améliorer le geste grâce aux feedbacks. Le fait de recevoir un montant important de feedbacks a donc donné l'impression aux sujets de ce groupe-là d'engranger une multitude de choses sur le geste à effectuer.

Enfin, l'analyse de l'item F6, « Je pense avoir amélioré mon geste plus facilement qu'avec une méthode d'apprentissage classique », montre une légère tendance, puisque les résultats n'étaient pas significatifs ($p = 0.061$). Le groupe ES-ES, avec une moyenne de 4.5, on peut imaginer que le groupe a eu l'impression, grâce, à nouveau, aux nombres importants de feedbacks reçus, que l'entraînement en réalité virtuelle pouvait être plus efficace qu'un entraînement plus classique. Les groupes S-S et ES-S ont, eux, donné une note moyenne neutre de 3. La quantité de feedbacks reçue par ces 2 groupes ne leur permettait pas d'évaluer la technologie en réalité virtuelle plus positivement qu'un entraînement classique.

4.3 Synthèse

Notre expérience est intéressante pour plusieurs aspects. L'une de ses particularités les plus notables est le fait que les sujets pouvaient choisir eux même la vitesse à laquelle ils

effectuaient le geste, l'expert s'adaptant lui à la vitesse de l'apprenant. Dans toutes les études présentées précédemment dans notre travail, aucune ne permettait au sujet de choisir lui-même la vitesse et de mener le mouvement. Dans les autres études, c'était à chaque fois le professeur, l'expert, qui menait le mouvement et le sujet devait s'adapter à l'expert. Dans notre cas, il y a une véritable interactivité entre le sujet et l'expert puisque le sujet va à son propre rythme et peut, en plus de gérer la vitesse, aller comme bon lui semble, soit vers l'avant, soit revenir en arrière dans son geste, afin d'observer au mieux le mouvement de l'expert. Ceci donne une grande liberté à l'apprenant qui va pouvoir, selon ses besoins, observer un moment très précis dans le geste en arrêtant son mouvement, ou au contraire, répéter le geste à diverses vitesses pour l'apprendre au mieux.

Une autre caractéristique de notre entraînement est intéressante à relever. Eaves et al. (2011) ont mis en avant l'importance d'attirer l'attention des sujets sur les différents points clés du feedback, en l'occurrence dans notre expérience les membres et articulations clés. Nous avons choisi de ne diffuser à l'écran que la partie inférieure du corps, à savoir des hanches jusqu'aux pieds, afin de limiter les informations à traiter et, en plus de cela, à attirer directement l'attention sur les membres et articulations les plus pertinentes pour l'apprentissage du Mawashi-Geri. La plupart des études que nous avons présentées dans notre travail ont choisi de montrer le corps de l'apprenant et de l'expert en entier, ce qui peut surcharger l'apprenant en termes de feedback. Il nous paraît donc pertinent de filtrer dès le départ les feedbacks qui sont donnés aux sujets. De plus, le questionnaire nous montre que le fait de ne voir que le bas du corps n'est pas dérangeant, l'environnement en réalité virtuelle étant très bien accepté par les participants, qui l'ont jugé utile à l'apprentissage, et étant un très bon complément à un apprentissage classique.

Il faut encore relever qu'au vu du peu d'entraînement dont ont bénéficié les sujets dans notre expérience, il est intéressant qu'en prenant l'ensemble des sujets, nous obtenions une amélioration significative de la performance. En sachant cela, il serait intéressant de mener une expérience avec ce même dispositif afin de voir l'amélioration dont seraient sujet les participants sur une plus longue période, allant de plusieurs semaines à plusieurs mois. L'amélioration obtenue sur une séance est prometteuse et laisse imaginer que, sur une plus longue période, les résultats puissent être concluants. Prendre plus de sujets permettrait également d'obtenir des résultats statistiques plus « prononcés ».

Il y a également quelques critiques à faire à propos de notre travail. Tout d'abord, il était intéressant de travailler un mouvement dynamique comme le Mawashi-Geri, mais il est possible que ce mouvement soit trop compliqué pour les apprenants. Un mouvement plus

simple pourrait donner de meilleurs résultats. En effet, plus un mouvement est dynamique, plus la complexité augmente, plus l'apprentissage est compliqué, et donc, plus il est difficile d'obtenir des résultats significatifs.

Le fait que les sujets ne bénéficient, dans notre expérience, que d'un seul angle de vue est peut-être trop restrictif puisque la réalité virtuelle permet facilement de changer de point de vue. Il paraît assez évident que l'ajout de certains points de vue vont bénéficier au sujet dans sa compréhension et sa construction mentale du geste à effectuer. Bailenson et al. (2008) ont démontré dans leur expérience que l'ajout d'un nouveau point de vue permettait d'encourager l'apprentissage. La réalité virtuelle donne la possibilité d'exploiter un très grand nombre d'angles différents. Dans l'idéal, il faudrait que le sujet puisse choisir lui-même, de manière facile et rapide, l'angle de vue afin de saisir au mieux le geste.

Pour des expériences futures, il serait donc tout d'abord intéressant d'affiner encore un peu la technologie afin d'éviter au maximum les problèmes techniques qui pourraient survenir (saut du squelette de l'expert entre deux positions), ainsi qu'améliorer, dans la mesure du possible, le suivi de l'avatar de l'expert. Le problème des chaussons pourrait également facilement être corrigé en y ajoutant une matière adhésive.

Concernant le mouvement à étudier, il serait bien sûr intéressant d'expérimenter une large palette de mouvements, que ce soit des mouvements de karaté, ou d'autres gestes sportifs. Il serait pertinent également de classer les mouvements par difficulté d'apprentissage afin de voir à quel point la technologie en réalité virtuelle est à même d'aider à l'apprentissage moteur.

Il serait également intéressant de donner la possibilité aux apprenants de voir leur avatar et celui de l'expert sous différents angles (Jelani et al., 2019). En effet, l'un des avantages de la réalité virtuelle, utilisée comme nous l'avons fait, est de pouvoir changer pratiquement à l'infini de point de vue, et permet donc de saisir tous les moindres détails du mouvement à effectuer. Ceci n'est que moyennement possible avec l'utilisation de la vidéo, alors qu'avec la réalité virtuelle, le changement de point de vue se fait très facilement. Plusieurs expériences citées dans ce travail utilisent déjà différents points de vue (Bailenson et al., 2008 ; Hoang et al., 2016), il serait donc intéressant de faire de même.

Selon une étude de Chye et al. (2012) concernant l'apprentissage de la boxe, ils ont remarqué que, lorsque les sujets portaient de vrais gants de boxe, qui pourtant ne leur donnaient aucun avantage, les résultats étaient meilleurs que lorsqu'ils n'en portaient pas. Ceci est sans doute dû au fait que les sujets se sentaient plus en immersion dans l'expérience. Il pourrait donc être intéressant de développer, dans ce but-là, à la fois les avatars que les participants voient à

l'écran, ainsi que l'environnement autour du sujet, comme par exemple créer un dojo virtuel, et de voir si ceci a un effet sur l'apprentissage.

Enfin, si dans notre expérience, nous avons cherché à voir si un entraînement ponctuel permettait un apprentissage, il serait évidemment intéressant de mener l'entraînement sur plusieurs semaines voire plusieurs mois, afin de voir les possibilités et les limites de la réalité virtuelle.

5 Conclusion

Nous avons obtenu certaines pistes intéressantes concernant l'utilisation de la réalité virtuelle dans un contexte d'apprentissage moteur. L'expérience que nous avons menée a démontré que, tous groupes confondus, un entraînement ponctuel permettait d'obtenir des résultats significatifs. Concernant l'analyse groupe par groupe, les résultats étaient plus mitigés. Si tous les groupes ont démontré une amélioration de la performance en termes de centimètres, seul le groupe S-ES a montré une amélioration significative, ce qui est en soit, vu le petit nombre de participants, un résultat très encourageant. Cette donnée nous permet de dire que ce n'est pas le groupe recevant le plus de feedbacks qui montre la plus grande amélioration. Ceci confirme ce que Salmoni et al. (1984) ont mis en avant, et que nous avons cité dans nos hypothèses, à savoir que lorsque l'apprenant reçoit trop de feedbacks, il peut avoir de la peine à les traiter correctement et à les intégrer. La comparaison des améliorations de la performance entre elles n'a, en revanche, pas donné de résultats significatifs. Cependant, en ayant plus de participants, il est probable que nous ayons obtenu des résultats significatifs. Ces résultats correspondent, en partie, à ce que nous avions attendu, à savoir que le groupe contrôle ne s'améliorerait pas de manière significative, alors que les autres oui.

Le questionnaire a, lui, permit de voir que, de manière générale, la technologie en réalité virtuelle dans le cadre de l'apprentissage moteur était un outil intéressant (du point de vue qualitatif). La plupart des sections du questionnaire ont reçu une note moyenne entre 4 et 5, qui correspond à l'évaluation « tout à fait d'accord ». Cette évaluation subjective est encourageante et montre que, non seulement la technologie utilisée était au point, mais également que cet environnement en réalité virtuelle a éveillé la curiosité chez les participants et a provoqué une impression de compétence chez les sujets. Le questionnaire a également permis de mettre en avant des différences importantes entre les groupes par rapport aux feedbacks que chacun recevait. Il semblerait ainsi que, pour produire une performance, les sujets doivent être suffisamment stimulés afin de rester concentrés et motivés. Les résultats du questionnaire ont atteint nos attentes, et place la technologie en réalité virtuelle plutôt comme un bon complément à l'apprentissage classique qu'un réel substitut.

Cette expérience apporte donc des informations concluantes concernant la réception de la technologie par les participants et met en avant l'importance de ne pas surcharger les sujets de feedbacks. Il serait intéressant de prolonger l'entraînement en réalité virtuelle sur plusieurs semaines afin de voir l'efficacité de la technologie sur une plus grande période.

Bibliographie

- Adams, J.A. (1992). *Revue historique et critique de la recherche sur l'apprentissage, la rétention et le transfert des habiletés motrices*. Paris : Revue Eps.
- Anderson, F., Grossmann, T., Matejka, J. & Fitzmaurice G. (2013, octobre). *YouMove : Enhancing movement training with an augmented reality mirror*. Collaboration présentée lors de la 26^{ème} Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, St-Andrews, Ecosse. doi:10.1145/2501988.2502045
- Arbabi, A. & Sarabandi, M. (2016). Effect of performance feedback with three different video modeling methods on acquisition and retention of badminton long service. *Sport Science*, 9, 41-45.
- Bailenson, J., Patel, K., Nielsen, A., Bajscy, R., Jung, S. H. & Kurillo, G. (2008). The effect of interactivity on learning physical actions in virtual reality. *Media Psychology*, 11(3), 354-376. doi:10.1080/15213260802285214
- Bandura, A. (1977). *Social Learning Theory*. Englewood Cliffs (NJ) : Prentice-Hall.
- Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B. & Delamarche, P. (2004). Using virtual reality to analyze links between handballs thrower kinematics and goalkeeper's reactions. *Neuroscience Letters*, 372(1-2), 119-122. doi:10.1016/j.neulet.2004.09.023
- Bozec, Y. (2017). L'apprentissage à travers la réalité virtuelle. *CANOPE R&D Etat de l'art*. Accès à l'adresse https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/agence_des_usages/Etat_Art.pdf
- Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. & Craig, C. (2009). Detecting deceptive movement in 1 vs. 1 based on global body displacement of a rugby player. *The International Journal of Virtual Reality*, 8(4), 31-36. doi:10.20870/IJVR.2009.8.4.2746
- Brockmyer, J. H., Fox, C. M., Curtiss, K. A., McBroom, E., Burkhart, K. M. & Pidruzny, J. N. (2009). The development of the Game Engagement Questionnaire : A measure of engagement in video game-playing. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4), 624-634. doi:10.1093/iwc/iwt003
- Buekers, M. J. (1995). L'apprentissage et l'entraînement des habiletés motrices et sportives. Dans J. Bertsch & C. Le Scanff (éd.), *Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissage* (p. 27-47). Paris : Presses universitaires de France.
- Burns, A. M., Kulpa, R., Durny, A., Spanlang, B., Slater, M. & Multon, F. (2011). Using virtual humans and computer animations to learn complex motor skills : a case study in karate. *BIO Web of Conferences*, 1. doi:10.1051/bioconf/20110100012

- Cano Porras, D., Sharon, H., Inzelberg, R., Ziv-Ner, Y., Zeilig, G., & Plotnik, M. (2019). Advanced virtual reality-based rehabilitation of balance and gait in clinical practice. *Therapeutic Advances in Chronic Disease*, 10, 1-16. doi:10.1177/2040622319868379 10
- Chan, J. C. P, Leung, H., Tang, J. K. T. & Komura, T. (2011). A virtual reality dance training system using motion capture technology. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(2), 187-195. doi:10.1109/TLT.2010.27
- Chen, J. (2007). Flow in games (and everything else). *Communications of the ACM*, 50(4), 31-34. doi:10.1145/1232743.1232769
- Chye, C., Sakamoto, M. & Nakajima, T. (2012, août). *Game Based Approach to Learn Martial Arts for Beginners*. Collaboration présentée lors de la 18^{ème} conférence IEEE, RTCSA, Séoul, Corée du Sud. doi:10.1109/RTCSA.2012.37
- Coefficient alpha de Cronbach. (s.d.). Accès à l'adresse <https://www.irdp.ch/institut/coefficient-alpha-cronbach-2030.html>
- Delignières, D. (2017). *Psychologie du sport*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Dockx, K., Bekkers, E. M., Van den Bergh, V., Ginis, P., Rochester, L., Hausdorff, J. M.,...Nieuwboer, A. (2016). Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *The Cochrane database of systematic reviews*, 12(12). doi:10.1002/14651858.CD010760.pub2
- Eaves, D., Breslin, G., Schalk, P. & Spears, I. R. (2011). The short-term effects of real-time virtual reality feedback on motor learning in dance. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, 20(1), 62-77. doi:10.1162/pres_a_00035
- Funakoshi, G. (1979). *Karate-Do Kyohan : le livre du maître*. Paris : France Shotokan.
- Gray, R. (2017). Transfer of training from virtual to real baseball batting. *Frontiers in Psychology*, 8,(2183). doi:10.3389/fpsyg.2017.02183
- Habersetzer, R. (2017). *Karaté pratique : Du débutant à la ceinture noire*. Noisy-sur-Ecole : Budo Editions.
- Hoang, T. N., Reinoso, M., Vetere, F. & Tanin, E. (2016, octobre). *Onebody : Remote posture guidance system using first person view in virtual environment*. Collaboration présentée lors de NordiCHI'16, Gothenburg, Suède. doi:10.1145/2971485.2971521
- Jelani, N. A. M., Zulkifli, A. N., Yusoff, M. & Ismail, S. (2019). Evaluation of users toward the Virtual Taekwondo Training Environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6s2), 185-192.

- Kernodle, M. W. & Carlton, L. C. (1992). Information feedback and the learning of multiple-degree of freedom activities. *Journal of motor behaviour*, 24, 187-196. doi:10.1080/00222895.1992.9941614
- Kim, A., Schweighofer, N. & Finley, J. M. (2019). Locomotor skill acquisition in virtual reality shows sustained transfer to real world. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 16(1), 113. doi:10.1186/s12984-019-0584-y
- Kühnapfel, U., Cakmak, H. K., & Maass, H. (2000). Endoscopic surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation. *Computers and Graphics*, 24(5), 671-682. doi: 10.1016/S0097-8493(00)00070-4
- Labbe, P. (2017). Les cargos sans équipage et pilotés en réalité virtuelle c'est pour bientôt. Accès à l'adresse <https://www.realite-virtuelle.com/navires-cargos-realite-virtuelle-1809/>
- Labbe, P. (2019). La réalité virtuelle et augmentée bouleversent l'architecture et la construction. Accès à l'adresse <https://www.realite-virtuelle.com/realite-virtuelle-augmentee-architecture/>
- Labedan, P., Dehais, F., & Peysakhovich, V. (2018, octobre). *Évaluation de l'expérience de pilotage d'un avion léger en réalité virtuelle*. Collaboration présentée lors de la conférence ERGO'IA, Biarritz, France.
- Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G. & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *The Cochrane database of systematic reviews*, 11(11). doi: 10.1002/14651858.CD008349.pub4
- Li, Y., Shark, L. K., Hobbs, S. J., Ingham, J. (2010, juillet). *Real-time immersive table tennis game for two players with motion tracking*. Collaboration présentée lors de la 14^{ème} édition de l'International Conference on Information Visualisation, Londres, Angleterre. doi:10.1109/IV.2010.97
- Magill, R. (1993). Augmented feedback in skill acquisition. Dans R. N. Singer, M. Murphy & L. K. Lemant (éd.), *Handbook of research on sport psychology* (p.193-212). New-York : Macmillian.
- Makransky, G., Terkildsen, T. S. & Mayer, R. E. (2017). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60, 225-236. doi:10.1016/j.learninstruc.2017.12.007
- Melton, A. W. (1964). *Categories of Human Learning*. New-York : Academie Press.
- Merian, T. & Baumberger, B. (2007). Le feedback vidéo en éducation physique scolaire. *De Boeck Supérieur*, 2(76), 107-120. doi:10.3917/sta.076.0107.

- Michalski, S. C., Spzak, A., Saredakis, D., Ross, T. J., Billinghamurst, M. & Loetscher, T. (2019). Getting your game on : Using virtual reality to improve real table tennis skills. *PLoS ONE*, 14(9). doi:10.1371/journal.pone.0222351
- Miles, C. M., Serban R. P., Simon, J. W., Gavin, P. L. & Nigel, W. J. (2012). A review of virtual environments for training in ball sports. *Computers and Graphics*, 36, 714-726. doi:10.1016/j.cag.2012.04.007
- Mohnsen, B. S. (2001). *Using technology in physical education*. Cerritos: Bonnie's Fitware.
- Rothstein, A. L. & Arnold, R. K. (1976). Bridging the gap : Application of research on videotape feedback and bowling. *Motor skills : theory into practice*, 1, 36-61.
- Rubio, S., Diaz, E., Martin, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile. *Applied Psychology : An International Review*, 53(1), 61-86. doi:10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x
- Ruffaldi, E., Bardy, B., Gopher, D., Bergamasco, M. (2011). Feedback, affordances, and accelerators for training sports in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 20(1), 33-46. doi:10.1162/pres_a_00034
- Salmoni A. W., Schmidt R. A. & Walter C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning : a review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95(3), 355-86.
- Schmidt, R. A. (1982). *Motor control and Learning : A behavioral emphasis*. Champaign : Human Kinetics Publishers.
- Schmidt, R. A. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris : Vigot.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning : a behavioral approach*. Champaign : Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning : a behavioral emphasis* (4^{ème} édition). Champaign : Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C. J., Wulf, G. & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor control and learning : A behavioral emphasis* (6^{ème} édition). Champaign : Human Kinetics.
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R. & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : A review. *Psychonomic Bulletin Review*, 20(1), 21-53. doi:10.3758/s13423-012-0333-8
- Silem, A. (2016). US Army – La réalité virtuelle sur le champ de bataille. Accès à l'adresse <https://www.realite-virtuelle.com/realite-virtuelle-usarmy>

- Swinnen, S. P., Lee, T. D., Verschueren, S., Serrien, D. J. & Bogaerds, H. (1997). Interlimb coordination learning and transfer under different feedback conditions. *Human Movement Science*, 16, 749-785. doi:10.1016/S0167-9457(97)00020-1
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology : toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3), 425-478. doi:10.2307/30036540
- Vereijken, B. & Whiting H. T. (1990). In defense of discovery learning. *Canadian Journal of Sport Science*, 15, 99-106.
- Vignais, N., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S., Multon, F. & Bideau, B. (2010). Influence of the graphical levels of detail of a virtual thrower on the perception of the movement. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 19(3), 243-52. doi:10.1162/pres.19.3.243
- Winnykamen, F. (1990). *Apprendre en imitant*. Paris : Presse Universitaire de France.
- Witmer, B. G. & Singer M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. doi:10.1162/105474698565686

Annexe

Questionnaire :

Bonjour, ce questionnaire a pour but d'évaluer les méthodes d'apprentissage auxquelles vous avez été soumis. Ce questionnaire est **anonyme**.

Ce questionnaire est réalisé dans le cadre du travail de master de Léonard Clivaz par le groupe de recherche des sciences du sport et du mouvement de l'Université de Fribourg.

Temps approximatif : 5 à 10 min

Feedback :

Age : Homme ou Femme

Droitier ou Gaucher

Pour l'ensemble des questions suivantes, donnez une évaluation allant de 1 (Absolument pas d'accord) à 5 (Tout à fait d'accord) :

	Charge mentale	1	2	3	4	5
A1	J'ai dû faire des efforts considérables durant l'entraînement (réflexion, décision, mémorisation etc.)					
A2	La tâche m'a paru (<u>mentalement</u>) simple et atteignable					
A3	Je pense que ma performance a atteint les attentes de l'expérimentateur					
A4	J'ai dû considérablement me concentrer pour accomplir l'entraînement					
A5	Durant l'apprentissage, je me suis senti/e stressé/e, découragé/e, irrité/e, fatigué/e					

	Engagement	1	2	3	4	5
B1	Lors de l'entraînement en réalité virtuelle, je me suis senti/e totalement absorbé/e, engagé/e					
B2	L'entraînement en réalité virtuelle a excité ma curiosité					
B3	L'utilisation de la réalité virtuelle est divertissante					
B4	L'utilisation de la réalité virtuelle m'a aidé à bien comprendre le geste à effectuer					
B5	L'utilisation de la réalité virtuelle a éveillé mon intérêt lors de l'apprentissage					

	Présence	1	2	3	4	5
C1	L'interaction avec l'environnement virtuel était facile et naturelle					
C2	Je me suis senti/e impliqué/e dans l'expérience de l'environnement virtuel					
C3	Je me suis rapidement adapté/e à la réalité virtuelle					
C4	Je me suis senti/e présent/e et concentré/e dans l'entraînement					

	Utilité	1	2	3	4	5
D1	En utilisant la réalité virtuelle, je suis capable de perfectionner mon geste					
D2	Selon moi, l'utilisation de la réalité virtuelle est un bon complément pour améliorer ma performance en plus d'un entraînement classique					
D3	La réalité virtuelle peut améliorer l'interaction apprenant-entraîneur					
D4	La possibilité d'adapter ma vitesse d'apprentissage et de déroulement (avant – arrière) m'a permis de mieux comprendre le mouvement et de mieux l'apprendre (représentation mentale)					
D5	La possibilité d'adapter ma vitesse d'apprentissage et le déroulement (avant-arrière) me paraît mieux qu'un suivi de mouvements dont je ne maîtrise pas la vitesse					
D6	Cette application de réalité virtuelle est plus utile qu'un entraînement classique avec un entraîneur					
D7	Cette application de réalité virtuelle est plus utile qu'un entraînement classique seul avec une vidéo					

	Usabilité (aisance d'utilisation)	1	2	3	4	5
E1	L'environnement est très réactif à mes actions					
E2	A la fin de l'expérience, je me sentais compétent/e dans la tâche apprise					
E3	La qualité graphique a influencé négativement mon apprentissage					
E4	Mon interaction avec la réalité virtuelle était claire et compréhensible					

	Satisfaction	1	2	3	4	5
F1	Je suis satisfait de l'entraînement effectué en réalité virtuelle					
F2	Je suis satisfait de l'effet global de l'entraînement					
F3	Je pense que la RV peut encourager mon intention d'apprendre					

F4	Je pense que la RV est un bon outil d'apprentissage					
F5	Je pense avoir amélioré mon geste plus rapidement qu'avec une méthode d'apprentissage classique					
F6	Je pense avoir amélioré mon geste plus facilement qu'avec une méthode d'apprentissage classique					

	Acceptabilité	1	2	3	4	5
G1	Je pense que c'est une bonne idée d'utiliser la RV dans l'apprentissage					
G2	C'est agréable d'apprendre avec la RV					
G3	J'ai eu du plaisir en apprenant avec la RV					
G4	J'utiliserais volontiers la RV dans mon domaine (autre sport, travail, etc.)					

Merci de votre collaboration,
Clivaz

Léonard

Thibaut Le Naour