

Comparaisons de feedback exo/égocentrés pour l'appren- tissage du coup droit au tennis en réalité virtuelle

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

déposé par

Lionel Lugon

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. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller
Thibaut Le Naour

Fribourg, Juin 2019

Table des matières

Résumé	3
1 Introduction.....	4
1.1 Contexte scientifique	4
1.2 Objectifs.....	12
1.3 Hypothèse	12
2 Méthode	13
2.1 Description de l'échantillon.....	13
2.2 Instruments de recherche	13
2.3 Design de l'expérience	18
2.4 Analyse statistique	21
3 Résultats	22
3.1 Données sur les mouvements virtuels	22
3.2 Données sur le score de précision.....	24
4 Discussion	25
4.1 Interprétation des données virtuelles	25
4.2 L'évolution des scores de précision selon les groupes	26
4.3 Limites et biais de cette expérience	27
4.4 Ouverture pour les futures recherches	28
5 Conclusion	30
Références	31
Annexes	35

Résumé

La possibilité d'entraîner des habiletés motrice grâce à un environnement virtuel est en plein développement dans le domaine des théories de l'apprentissage moteur. Les avancées technologiques restent émergentes et le matériel coûteux, mais plusieurs études ont déjà été menées dans le but de reproduire des conditions d'apprentissage moteur efficaces à l'aide de la réalité virtuelle/augmentée. Xu et al. (2010) ont développé un environnement virtuel immersif appelé « Tennis Cave », ayant reçu des feedbacks positifs (sur le suivi de trajectoire en temps réel, la modélisation de l'environnement, ...) de la part de leurs utilisateurs dans la simulation de la pratique du tennis. Le but de notre expérience est de créer un environnement virtuel non-immersif permettant l'apprentissage du coup droit au tennis chez des amateurs en utilisant des concepts éprouvés des théories de l'apprentissage moteur. Aussi, nous avons employé un modèle d'interface homme machine (IHM) en réalité virtuelle (RV) pour tester un apprentissage par feedbacks visuels liés au focus d'attention des apprenants. L'utilisation de la capture de mouvement a permis une collecte des données cinématiques.

Le tennis est un sport comprenant de nombreux mouvements complexes et un développement technique de la gestuelle au centre de l'apprentissage. Au vu de la difficulté du mouvement du coup droit, nous pensons que des joueurs novices pourraient acquérir plus rapidement une base technique et améliorer leur précision plus facilement avec une méthode d'apprentissage en RV qu'avec une méthode d'apprentissage classique. De plus, le fait d'utiliser un environnement virtuel nous permet d'identifier et d'analyser les composantes clés du mouvement de manière plus riche qu'avec une approche réelle. Les participants ont été sélectionnés en tant qu'amateur de tennis. Ils ont été répartis en 3 groupes de 5-7 personnes et se sont entraînés différemment selon leur protocole d'apprentissage. La procédure complète de l'expérience est rendue possible grâce à deux applications : Motive et Coplab. La première est liée à la capture du mouvement et la création d'un squelette virtuel qui réagit en temps réel. La deuxième s'occupe d'établir et de projeter les feedbacks de l'expérience au sujet. Grâce à ces deux programmes, les sujets se sont entraînés à 4 reprises et ont passés 6 tests lors de 5 séances réparties sur 20 jours maximums.

Les résultats montrent une amélioration de la précision chez plusieurs groupes. Quelques tendances ont aussi pu être observées sur les données virtuelles collectées mais à cause d'un nombre de sujets insuffisant, aucune conclusion ne peut être tirée avec certitude. Certaines modalités sur la mise en place d'environnement virtuel dans le cadre de l'apprentissage moteur sont discutées à la fin de ce travail.

1 Introduction

Le tennis est un sport de premier plan en Suisse grâce notamment à des acteurs professionnels populaires et un développement efficace du sport dans le pays. Il fait partie de la catégorie des sports téléo-cinétiques qui visent à mesurer l'efficacité d'un mouvement non par sa forme, mais plutôt par son effet sur le jeu. De ce fait, l'apprentissage du tennis est délicat car il ne consiste pas à copier simplement un mouvement existant, mais à s'approprier une technique efficace en éliminant les erreurs qui pourraient nuire à cette efficacité. L'entraînement classique consiste à s'exercer sur un court de tennis avec un moniteur qui démontre et corrige les mouvements au fur et à mesure de la leçon selon différents thèmes. Ce processus comprend donc l'imitation d'une forme discrète de divers mouvements (ceux du moniteur) et la correction périodique des erreurs survenant durant les exercices. Étant un sport comme un autre, son développement est influencé par les théories de l'apprentissage moteur et les possibilités d'entraînement non-classiques sont multiples au regard des différentes recherches déjà effectuées dans le domaine.

Une nouvelle approche consiste à utiliser la technologie sous la forme de réalité virtuelle pour acquérir les bases d'un mouvement complexe comme le coup droit au tennis. Cette possibilité novatrice doit non seulement prendre en compte les recherches et les théories liées à l'apprentissage moteur classique, mais aussi inclure et explorer ce terrain nouveau qu'est la virtualité dans le sport. Le but de ce travail est d'expérimenter une forme d'apprentissage dans cet environnement virtuel en utilisant des éléments bien connus de l'apprentissage moteur que sont les feedbacks visuels et le focus d'attention. Dans cette section, il est nécessaire de donner les clés de la compréhension de notions essentielles ainsi que de faire l'état de la recherche sur les éléments théoriques exploités dans ce travail.

1.1 Contexte scientifique

Le but de ce chapitre est de présenter les bases théoriques et les avancées scientifiques relatives à la compréhension de ce travail. Bien entendu, nous nous focalisons sur les aspects utiles et proches de l'expérience que nous présentons. Parmi les enjeux à exposer, on trouve tout d'abord la modélisation vidéo qui consiste à créer une source d'informations pertinentes sur un mouvement à l'aide d'une exécution motrice référence. Par ailleurs, cette thématique est fortement liée au concept d'imitation et de feedback vidéo. La notion de feedback sera donc elle-aussi approfondie et plus particulièrement du point de vue du focus d'attention (externe/interne) dans

l'apprentissage moteur. Enfin, nous parlerons des technologies de réalité virtuelle/augmentée et leurs liens avec l'apprentissage moteur et tous les enjeux précédemment mentionnés.

1.1.1 La modélisation dans l'apprentissage moteur.

L'imitation du modèle au service de l'apprentissage moteur. Dans l'apprentissage moteur, on parle de modélisation vidéo (*vidéo modeling*) lorsque l'apprenant reçoit un feedback visuel comprenant une exécution de la tâche motrice soit par lui-même (*self-modeling*), soit par un expert (*expert modeling*). Ce type d'apprentissage repose donc grandement sur l'imitation. La seule observation du modèle active les neurones miroirs mis en avant par Rizzolatti (2006). Les mécanismes spécifiques d'activation et de but de ces neurones sont divers et complexes. Une de leurs fonctions fondamentales qui nous intéresse est « de constituer un mécanisme qui projette une description de l'action » (p.1) à partir des aires visuelles vers les aires motrices. L'auteur note que ces neurones ne codent pas seulement l'action observée (*ce* que le modèle fait) mais aussi l'intention du mouvement (*pourquoi* il le fait). Cette réaction survient même si le mouvement est incomplet voire en anticipation de celui-ci. Atienza, Balaguer et García-Merita (2011) ont mis en avant une différence significative entre un entraînement classique de tennis et des entraînements incluant une imitation du modèle via une vidéo. Le fait d'ajouter une modélisation vidéo dans un entraînement classique a permis une amélioration significative de l'apprentissage par rapport à un entraînement technique basique. L'inclusion d'un modèle vidéo serait donc un complément efficace dans l'apprentissage moteur, encore faut-il choisir le bon modèle. Selon Zetou (2005), il est préférable de choisir un modèle expert dans l'exécution motrice plutôt qu'un débutant ou soi-même. Lors de cette étude, il est aussi intéressant de noter que chaque groupe reçut des signaux oraux pendant la modélisation vidéo. L'influence de consignes orales et de répétitions d'instructions a été explorée par Meaney (1994) dans le cadre de l'acquisition, la rétention et le transfert d'une nouvelle tâche motrice chez les jeunes adolescents et les adultes. Bien que des différences soit présentes chez les adolescents, les performances des adultes ne sont pas influencées par la présence ou l'absence de signaux verbaux. Cela suggère que les conditions optimales d'utilisation d'un modèle dans l'apprentissage moteur sont plus liées au développement cognitif de l'apprenant plutôt qu'aux instructions orales données durant cet apprentissage. Notons que la similarité du modèle par rapport à l'apprenant est pertinente dans la recherche de l'optimisation de l'entraînement (McCullagh, 2016). En effet, si le sujet peut reconnaître certains traits communs entre le modèle et lui-même, il peut alors établir un lien plus facilement entre son mouvement et le mouvement cible. Encore plus efficace, le

fait de combiner vidéo modeling et feedback vidéo (*self-modeling*) permet d'augmenter la performance dans des sports comme dans la gymnastique par exemple (Boyer, Miltenberger, Batsche & Fogel, 2009).

L'imitation d'un mouvement complexe. Rizzolatti (2006) soulève une caractéristique intéressante des neurones miroirs : Aucune information concernant les mécanismes sous-jacents du mouvement ne peut être captée par ceux-ci. Cette description de l'action ne contient donc pas les caractéristiques fines du mouvement. L'imitation d'un mouvement s'en trouve alors limitée, d'autant plus si celui-ci est complexe. Afin de situer le propos correctement, il nous faut définir dans quelle catégorie de mouvement se place le coup droit au tennis. Tout d'abord, Desmurget (2006) distingue les habiletés motrices téléo-cinétiques et morpho-cinétiques. Ces dernières définissent une tâche motrice où l'on doit reproduire une forme gestuelle spécifique à partir d'un modèle pratiquement invariant (e.g. effectuer un salto en gymnastique aux agrès, un triple axel en patinage artistique, ...). Tandis que la téléo-cinèse évalue l'efficacité avec laquelle on agit sur un environnement donné (e.g. gagner un point au tennis, faire une passe décisive en sport collectif, ...). Dans ce dernier cas, le mouvement idéal n'est donc pas représenté par une forme parfaite, mais par une réponse motrice qui s'adapte dans son espace d'action en évitant les erreurs possibles. On peut alors se demander si l'apprentissage par imitation est tout autant pertinent dans un environnement téléo-cinétique que morpho-cinétique. Desmurget (2006) soulève trois arguments contre ce type d'apprentissage dans une telle situation. Premièrement, le choix du modèle manque de fondement théorique et est souvent arbitraire voire situationnelle. Deuxièmement, il y a une variabilité dans les représentations sensori-motrices liées au feedback qui n'est pas en adéquation avec la finalité du mouvement. Autrement dit, le feedback seul n'est pas suffisant pour retranscrire l'intention du mouvement à imiter. Enfin, les conditions d'apprentissages peu changeantes peuvent nuire au développement adaptatif ultérieur des habiletés motrices. De plus, l'auteur rajoute que si l'élève ne possède pas une bonne représentation figurative de son corps et de ses mouvements, alors une plus grande différence apparaît entre les mouvements présentés et performés. Une autre façon d'appréhender le coup droit au tennis est en tant que mouvement complexe au sens où l'entendent Wulf et Shea (2002, p.186) : « une habileté motrice qui ne peut être maîtrisée en un seul entraînement, qui possède une multitude de degrés de libertés et qui tend vers une écologie (fluidité et économie d'énergie) du mouvement ». Cette catégorisation du mouvement en tant que complexe permet une approche différente des concepts énoncés plus haut. En effet, Desmurget (2006) ajoute que la démonstration

(et donc l'imitation) est une méthode d'apprentissage efficace pour une nouvelle habileté motrice complexe au sens où, même si elle semble nuire au développement de la variabilité du mouvement chez l'apprenant, elle permet l'établissement d'une base motrice solide sans surcharge cognitive. De plus, l'apprentissage par observation est déjà reconnu comme efficace dans l'acquisition d'habiletés motrices qu'elles soit simples ou complexes (Wulf, Shea, & Lewthwaite, 2010). Shea, Wright, Wulf et Whitacre (2000) ont pu aussi relever une optimisation de cette efficacité lorsque l'entraînement par observation est combiné avec la pratique physique. En définitive, l'apprentissage par observation d'un modèle est une perspective intéressante dans le cadre de ce travail car les sujets sont des débutants dans une tâche motrice complexe.

1.1.2 Feedbacks et focus attentionnel. En parlant des méthodes d'apprentissage moteur, nous nous intéressons de plus près au focus d'attention et aux différents feedbacks que nous pouvons prodiguer au sportif. Le but de ce chapitre reste d'identifier les méthodes d'apprentissages moteur pertinentes liées à l'apprentissage par observation que nous allons utiliser dans le cadre de ce travail. En particulier, la capacité de moduler un feedback pour orienter l'utilisateur vers une correction de son mouvement plutôt qu'une simple imitation de l'expert nous intéresse particulièrement.

Apprentissage moteur et feedbacks. Le feedback occupe une place importante dans l'apprentissage moteur en tant que vecteur d'information liée à la performance du sujet par rapport à une tâche motrice spécifique (Wulf, Chiviacowsky, Schiller & Ávila, 2010). De plus, il contient une composante motivationnelle importante pour l'apprenant. Chiviacowsky et Wulf (2007) illustrent cela en observant une progression améliorée des sujets dans l'apprentissage lorsque le feedback est administré après un essai réussi plutôt qu'un essai raté. Fondamentalement, on distingue le feedback de résultat (*KR : Knowledge of Results*) et le feedback de performance (*KP : Knowledge of Performance*). Le KP se réfère à la qualité du mouvement et peut venir d'une source intrinsèque ou extrinsèque. De ce fait, il est souvent subjectif et est peu manipulé dans le cadre de notre travail. Le KR se rapporte à l'effet du mouvement sur son environnement et donc à une donnée plus quantitative de la performance. Il est aussi donné par une source externe de manière générale. Par exemple, une indication du coach sur la hauteur de la balle lors de la frappe d'un coup droit au tennis est un KP, tandis que la vitesse de la balle calculée par un radar est un KR. Dans le cadre de ce travail et dans les sources mentionnées par la suite,

la manipulation du KR est au centre de l'attention. Réussir à transmettre une information pertinente et accessible à l'aide d'un feedback repose sur plusieurs paramètres. Nous allons donc voir quelles modalités sont utiles à ce travail et sur quoi nous allons fonder l'élaboration de notre expérience. Tout d'abord, on s'intéresse de plus près à la notion de feedback augmenté. Celui-ci définit une transmission de l'information par une source externe (souvent un entraîneur ou un dispositif sensoriel) (Schmidt & Wrisberg, 2008). Par opposition, le feedback intrinsèque représente les afférences sensorielles et est, par définition, toujours présent lors de l'apprentissage moteur. C'est donc ce feedback augmenté que nous allons manipuler pour optimiser l'expérience de ce travail. Sigrist, Rauter, Riener et Wolf (2013) mettent en avant une relation entre la complexité de la tâche et l'efficacité du feedback augmenté (Figure 1).

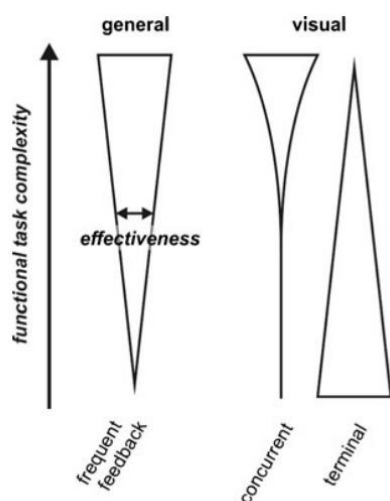


Figure 1. Corrélation entre le type de feedback (fréquent, concurrent et terminal) et la complexité de la tâche. (Sigrist et al., 2013)

En général, un feedback fréquent est plus efficace à mesure que l'habilité motrice entraînée est complexe. Cette relation est plutôt intuitive compte tenu de la quantité d'information plus importante qui est nécessaire à l'acquisition d'un mouvement complexe. Au contraire, trop d'informations dans le cadre de l'apprentissage d'un mouvement plus simple peut causer des interférences au cours de l'apprentissage. Dans la Figure 1 se trouve aussi la notion de feedback concurrent. Celui-ci est un type d'information transmis pendant l'exécution du mouvement (*live feed*) à l'apprenant. Une des observations de cette étude est que la concurrence du feedback n'est réellement efficace que lors de la première phase d'apprentissage du mouvement com-

plexe. Huegel et O'Malley (2010) expliquent cela en établissant un lien avec la *guidance hypothesis*. Celle-ci met en garde contre une présence trop fréquente de feedbacks qui agirait comme une interférence provoquant une dépendance à celui-ci lors de la phase d'acquisition d'un mouvement. Cette dépendance aurait alors pour effet d'interférer avec l'acquisition d'un mouvement stable à cause d'informations différentes administrées trop fréquemment. Cependant, un feedback concurrent peut aussi avoir un effet positif à un stade précoce de l'apprentissage en évitant une surcharge cognitive liée à la complexité du mouvement (Wulf & Shea, 2002). Il reste donc pertinent d'utiliser un feedback concurrent lors de la phase d'acquisition d'une nouvelle habilité motrice complexe comme dans le cadre de ce travail.

Focus d'attention interne (FI) et externe (FE). Dans l'apprentissage moteur, le focus d'attention représente une composante indissociable de la pratique sportive. Il est défini comme interne lorsque le sujet se concentre sur le mouvement de son corps ou d'une de ses parties. Au contraire, une attention externe est dirigée sur l'effet que le mouvement exerce sur son environnement (Wulf, Höß & Prinz, 1998). Depuis quelques années, il a été mis en évidence qu'un focus d'attention externe permet une meilleure amélioration (par rapport à un focus d'attention interne) de la performance et de l'apprentissage d'une habilité motrice (Wulf, 2013). Cette affirmation a été étudiée et prouvée dans nombre de différentes tâches, niveaux d'efficacités et groupe d'âges. En particulier, ce genre de focus d'attention externe permet d'accélérer le processus d'apprentissage vers un mouvement complexe (Wulf, Töllner & Shea, 2007). Lohse (2013) justifie cela en expliquant que les avantages d'un focus d'attention externe ont tendance à se manifester de manière différée. Cette latence permettrait à des processus cognitifs inconscients d'opérer un meilleur codage du mouvement au fil du temps. Wulf, McNevin et Shea, (2001) proposent l'hypothèse de l'action contrainte (*constrained action hypothesis*) pour expliquer cette supériorité du focus attentionnel externe. Cette hypothèse postule qu'un focus d'attention interne interfère avec le processus automatique de régulation du mouvement tandis qu'un focus d'attention externe permet une auto-organisation du système moteur accédant à un processus de contrôle inconscient et rapide du mouvement. Cette théorie est supportée par plusieurs études faisant état d'une automatisisation du mouvement améliorée lors de l'utilisation de focus attentionnel externe (Kal, Van Der Kamp & Houdijk, 2013; Porter, Makaruk & Starzak, 2016). De surcroît, Porter et al. (2016) suggèrent qu'un autre avantage du focus d'attention externe est une meilleure perception visuelle de l'objectif lié à la tâche motrice. Cette suggestion est soutenue par l'étude de Kasper, Elliott et Giesbrecht (2012) qui insistent sur l'avantage d'un focus d'attention externe pour le traitement de l'information visuelle. Il est donc pertinent

de s'appuyer sur des informations visuelles lorsque l'on utilise le focus externe. De plus, associer des feedbacks à ce type de focus attentionnel permet d'optimiser la performance et l'apprentissage moteur y compris lors de la rétention (Wulf, McConnel, Gärtner & Schwarz, 2002). Enfin, Wulf et al. (2010) ont relevé qu'associer une certaine liberté dans les conditions d'apprentissage incluant un focus attentionnel permet une optimisation de l'efficacité dans l'apprentissage d'une tâche motrice.

Les bénéfices du focus attentionnel ont donc été observés à de multiples reprises, mais dans tous ces cas, la façon d'administrer le feedback ou de donner des instructions à but d'attention externe s'est faite à l'aide de moyens classiques. Dans le cadre de ce travail, il s'agira d'utiliser ces recherches pour créer une expérience ayant une probabilité forte de reproduire ces résultats dans le cadre de la réalité virtuelle.

1.1.3 Apprentissage moteur et technologie de représentation virtuelle.

Ces dernières années, le développement de la technologie informatique et plus particulièrement de la réalité virtuelle/augmentée a permis d'ouvrir une nouvelle voie à la recherche dans l'apprentissage moteur. Un rapport populaire à cette percée technologique peut être trouvé dans les adaptations qu'ont subies les jeux vidéo en rapport à la réalité virtuelle/augmentée. Ces derniers peuvent désormais capter des mouvements dans l'espace et les retranscrire en réponse codée dans le jeu. De manière similaire, la recherche dans l'apprentissage moteur peut s'appuyer sur cette technologie afin d'accéder à des données et des résultats intéressants. Plusieurs études ont déjà montré que l'utilisation d'un environnement virtuel permet de favoriser certaines compétences liées à l'apprentissage moteur comme par exemple l'orientation spatiale au service de l'équilibre (Huang, Mao, Chen & Li, 2014).

Réalité virtuelle (RV) et réalité augmentée (RA). Le sens commun de réalité virtuelle implique l'immersion dans un espace d'action forgé de toute pièce et plus ou moins fidèle à la réalité à l'aide d'un dispositif sensoriel (visuel, auditif, tactile). De façon plus générale, Fuchs et Moreau (2006, p.4) définissent cette notion comme « un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et les interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D ». Dans ce travail, la notion de RV comprend toute association entre réel et virtuel.

Développement de la virtualité dans l'apprentissage moteur. Le but de l'apprentissage moteur est de créer une amélioration liée à un mouvement réel dans un environnement réel. Le principal

défi de la réalité virtuelle sera donc d'entraîner un mouvement réel dans un environnement virtuel (EV) et de créer des adaptations transférables à un environnement réel. Un EV représente une collection de technologies permettant à une ou plusieurs personnes d'interagir avec des modèles 3D (générés par l'informatique) en utilisant leur sens et leurs habiletés naturelles (Burdea & Coiffet, 2003; Slater, Steed & Chrysanthou, 2003). On peut définir trois éléments essentiels pouvant accroître l'efficacité d'un EV dans le contexte sportif (Miles, Pop, Watt, Lawrence & John, 2012)

- Un modèle physique cohérent avec une réponse en temps réel du programme informatique
- Une interface d'utilisation simple comportant des associations avec un environnement réel
- La capacité à offrir une variabilité dans l'apprentissage du mouvement

Un EV est créé spécifiquement pour une tâche ce qui peut avoir d'énormes avantages potentiels liés à l'apprentissage moteur. Par exemple, il est possible de générer plusieurs scénarios d'apprentissage, de donner au participant des informations supplémentaires sur le mouvement pour le guider ou encore de changer rapidement les modalités de l'environnement pour correspondre à une situation de compétition. Dès lors que l'on essaie de créer un EV pour apprendre un mouvement réel, la question de la fidélité par rapport à la réalité rentre en jeu. Miles et al. (2012) font la distinction entre la capacité à représenter le monde réel (fidélité de perception) et la capacité à réagir comme le monde réel (fidélité fonctionnelle). Cette dernière est plus intéressante dans le cadre de ce travail car elle ne nécessite pas une description détaillée de l'environnement mais plutôt une sélection des éléments clés liés à la tâche. Vignais et al. (2010) ont ainsi pu montrer que dans le cadre de lancer sportif une simple représentation de la balle par un point suffit pour l'analyse et à la présentation d'un mouvement. De plus, les compétences de représentation graphique sont encore très limitées dans le domaine de la réalité virtuelle ce qui favorise le développement et la manipulation de la fidélité fonctionnelle plutôt que la fidélité de perception. Un autre aspect important d'un entraînement utilisant la réalité virtuelle est l'interactivité que l'utilisateur peut avoir avec le programme. En effet, plus l'utilisateur a un contrôle intuitif et complet sur le déroulement de l'action en RV, plus les effets de l'entraînement lui seront bénéfiques. Aussi, la perspective joue un rôle primordial. Bailenson et al. (2008) ont pu observer une meilleure performance de la part des sujets en RV lorsqu'ils peuvent avoir une vision à la troisième personne de leur représentation virtuelle (avatar). Une autre manière d'augmenter cette composante essentielle qu'est l'interactivité consiste à donner au participant plusieurs angles de caméras pour enrichir sa perception des éléments virtuels de

l'apprentissage. Ainsi, l'utilisateur peut interagir de manière différente avec son avatar augmentant de fait la variabilité dans l'apprentissage.

Dans le cadre de ce travail, l'avantage le plus important d'un EV est l'identification de facteurs clés liés à la performance d'une habilité motrice. Par exemple, Kelly, Healy, Moran et O'Connor (2010) ont ainsi pu calculer un certain « X-factor » en tant que facteur déterminant de la performance pour la distance du swing au golf. Identifier les éléments clés de notre mouvement pour ensuite les présenter sous forme de feedbacks à notre apprenant est au centre de notre expérience.

1.2 Objectifs

Au cours de cette étude, nous visons à analyser et améliorer l'apprentissage du coup droit au tennis en identifiant les éléments clés de ce mouvement complexe et en les associant à différents feedbacks concurrents pour promouvoir une amélioration (objective et/ou subjective) chez un sujet débutant. La supériorité d'un feedback à focus externe par rapport à un feedback à focus interne a déjà été prouvée plusieurs fois mais jamais dans une optique d'apprentissage à l'aide de la réalité virtuelle. De plus, le fait de pouvoir utiliser cette technologie pour identifier les points importants d'un geste technique complexe, nous permet de proposer au sujet, via un des feedbacks, une correction de son mouvement plutôt qu'une simple imitation d'un mouvement déjà existant. Cette correction prend alors la forme de feedbacks variés distribués selon la décision du responsable de l'entraînement. Afin d'atteindre ces objectifs, l'expérience se doit de proposer une certaine liberté dans l'expression du mouvement ainsi que des éléments se rattachant à la réalité.

1.3 Hypothèse

Hypothèse H0 : Les feedbacks associés au focus d'attention et à la réalité virtuelle présente des résultats cohérents avec les recherches précédentes (i.e. un focus d'attention externe produira de meilleurs effets sur l'apprentissage par rapport au focus interne).

Hypothèse H1 : Le feedback varié permet une meilleure progression que les autres feedbacks simples.

Hypothèse H2 : Les scores de précision des sujets vont s'améliorer globalement mais subissent aussi l'effet des différents feedbacks et focus attentionnels.

2 Méthode

2.1 Description de l'échantillon

2.1.1 Experts. Nous avons sélectionné 7 joueurs de tennis pour jouer les rôles de modèle. Ces joueurs ont plusieurs années d'expérience en tant que compétiteur (classé entre R4 et R1) et/ou entraîneur certifié (J&S).

2.1.2 Sujets. Le type d'entraînement que l'on a proposé n'est pas adapté aux joueurs de tennis issus de club comme leur bagage technique est trop important pour pouvoir profiter pleinement des adaptations de l'entraînement. Nous avons donc sélectionné 18 personnes ayant déjà joué de manière autodidacte sans faire de tournoi pour autant. Afin que le modèle virtuel puisse être appliqué le plus fidèlement possible, nous nous sommes restreints à un échantillonnage de sujet similaire à ceux des experts : Homme, Droitier, 16 à 45 ans. Tous les sujets ont signé une déclaration de consentement (36) et ont certifié être dans les bonnes dispositions physiques et mentales pour la participation à l'expérience.

2.2 Instruments de recherche

2.2.1 Matériel et installations. L'expérience s'est déroulée dans sa totalité à l'intérieur du laboratoire de capture de mouvement situé au sous-sol de l'université de Péroilles à Fribourg.

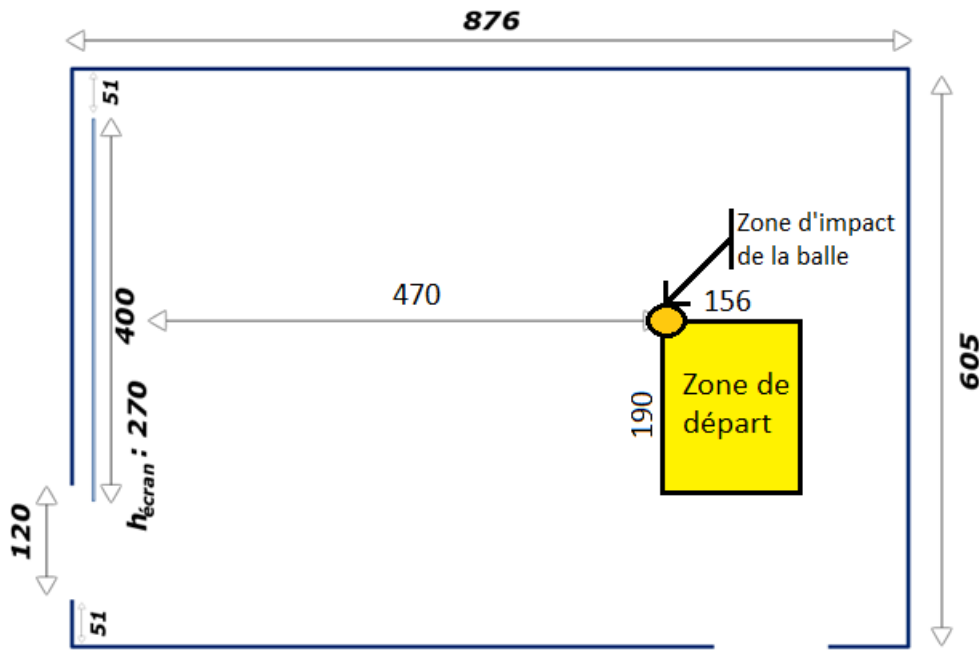


Figure 2. Plan des dimensions du laboratoire.

Les deux salles du laboratoire ont été utilisées. Dans la salle de capture (Figure 2), on a employé un ordinateur muni de 2 moniteurs ainsi qu'un beamer pour la projection de l'application Co-pLab. Le but de cette double projection est d'abord de pouvoir contrôler les différentes étapes de l'expérience (tests et entraînements avec feedbacks) tout en étant capable de donner la prochaine balle au sujet par le tube incliné, mais aussi d'utiliser le beamer pour projeter le feedback et les cibles à atteindre durant le test. De plus, le tube placé à une hauteur de 2m56 est un dispositif servant à normaliser la distribution de la balle dans notre expérience (Figure 3).

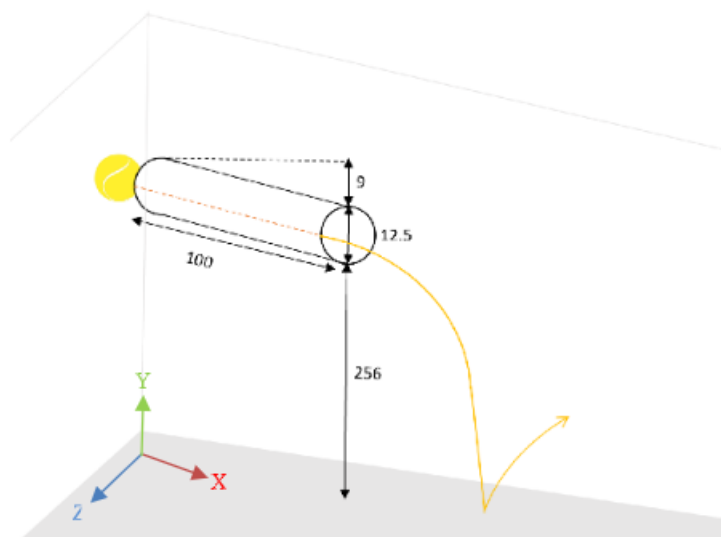


Figure 3. Plan de l'installation du tube incliné.

Il consiste tout simplement d'un tube assez large pour faire passer une balle de tennis (Equipement de capture) et placé de telle sorte que la balle rebondisse sur la marque au sol permettant au sujet d'anticiper la trajectoire de la balle. La raquette (Babolat Pure Drive Wimbledon 2016) est équipée de 3 marqueurs et des autocollants réfléchissants (min. 8) sont posés sur chacune des balles (Wilson US OPEN Extra Duty)³⁵. Dans la salle annexe, nous n'avons employé qu'un seul poste de travail pour exécuter l'application Motive qui nous permet de calibrer et contrôler les caméras. Pour capturer les mouvements, nous avons utilisé 16 caméras infrarouges (Optitrack Prime 41/17W) contrôlées par le logiciel Motive (C++/Windows) et fonctionnant à une fréquence minimum de 120Hz. Ce type d'équipement permet de repérer et traquer les marqueurs Optitrack avec une précision de <1mm pour le marqueur en lui-même et de <3mm pour la position d'une articulation. Ce système nous permet alors de construire un squelette lié à aux positions des marqueurs virtuels et donc de recréer virtuellement le mouvement du squelette selon la trajectoire des marqueurs. Chaque sujet a dû porter une combinaison noire sur laquelle nous avons placé des marqueurs réfléchissants. La combinaison comprend un haut à manche longues, un pantalon, deux gants, deux chaussons et un bonnet. En tout, 41 marqueurs sont placés sur le sujet ce qui nous permet de modéliser un squelette comportant 21 articulations au total (Figure 4).



Figure 4. Sujet portant la combinaison de capteurs (41).

2.2.2 Applications Motive et Caplab. L'application Coplab développée par l'équipe de l'Unifr nous a permis d'extraire et d'éditer les trajectoires virtuelles des marqueurs. Nous avons ainsi pu collecter des données précises et pertinentes sur le mouvement enregistré mais aussi filtrer et éditer le mouvement pour créer les différents feedbacks. Ceux-ci étaient directement disponibles via l'application une fois celle-ci correctement programmée. On pouvait alors afficher une superposition synchronisée d'un mouvement capturé en temps réel (squelette live du sujet avec Motive) avec un mouvement de référence (feedback spécifique avec Coplab). Dans le cadre de notre expérience, trois feedbacks différents ont été élaborés à l'aide de cette application :

1. Feedback Raquette : Comprend la trajectoire de la tête de raquette (tracé gris), la position lors de l'impact (Noir=Expert, Rouge=Sujet), les positions de l'expert avant et après l'impact et la trajectoire de la balle (Jaune=Expert, Rouge=Sujet) (Figure 5)
2. Feedback Squelette : Comprend la position du squelette lors des différentes phases du mouvement. Noir = Impact de l'expert. Gris=Avant/après impact de l'expert. Bleu= position live du sujet lors du feedback (Figure 6)
3. Feedback Mix : Comprend les 5 feedback différents (Raquette, Squelette, Angle Coude, Angle Poignet-Raquette, Appuis) (Figure 7)

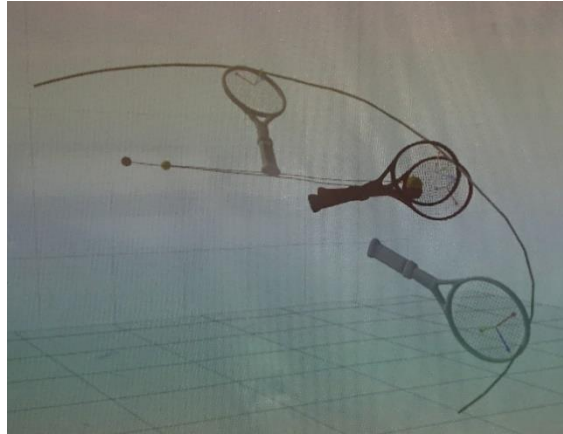


Figure 5. Feedback Raquette

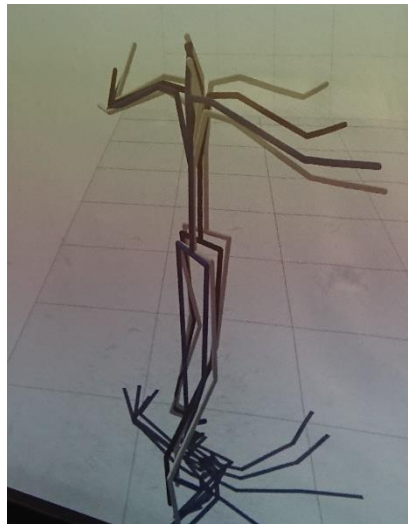


Figure 6. Feedback Squelette.

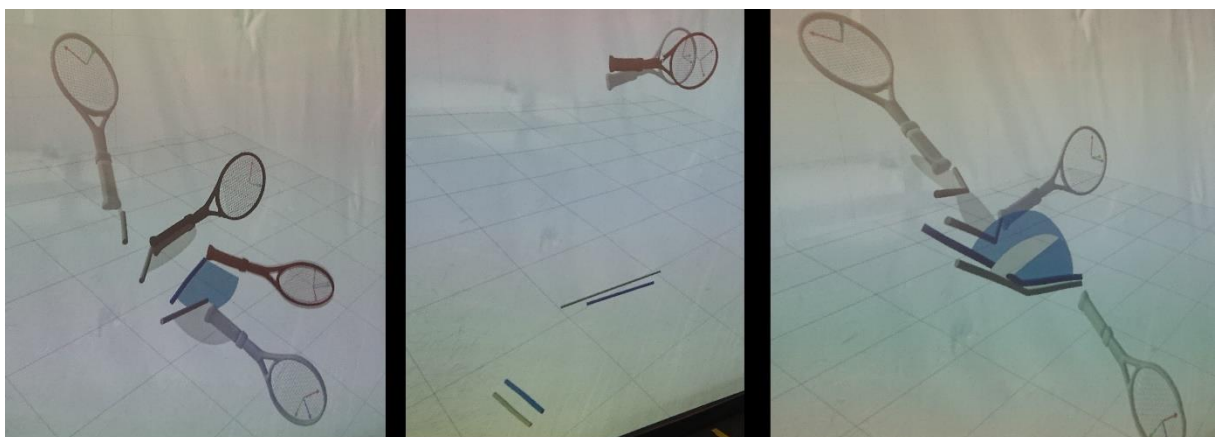


Figure 7. Feedback Mix. De gauche à droite : Angle Poignet-Raquette, Position Appui et Raquette à l'impact, Angle Coude.

2.3 Design de l'expérience

2.3.1 Déroulement de l'étude.

Modélisation des mouvements références. Chacun des experts a pu enregistrer environ 100 mouvements de son coup droit dans le laboratoire. La totalité de ces mouvements ont été triés et corrigés en post-traitement afin d'obtenir un maximum de mouvements corrects (min. 50 par expert) utilisables par l'application. Il est important de souligner que les experts ont enregistré leurs mouvements dans les mêmes conditions que les sujets lors de leur entraînement. Ensuite, une sous-application de Coplab (*Morphology.exe*) nous a permis d'associer à chaque sujet un expert qui lui correspondait morphologiquement.

Mesures sur les sujets. Les 18 participants ont été répartis en trois groupes selon le feedback qu'ils reçoivent durant leur entraînement (Raquette, Mix ou Squelette). Chaque personne a participé à quatre entraînements et six tests répartis sur cinq jours différents (Figure 8). Les quatre séances contenant les entraînements ont été répartis sur une période de dix jours maximums et la dernière séance contenant uniquement le test de rétention a été planifié une semaine après le dernier entraînement. Avant chaque passation, le sujet a eu l'opportunité de s'échauffer et de frapper un minimum de 5 balles dans les mêmes conditions que l'expérience.

Consignes liées au mouvement. Après avoir été équipé de la combinaison de marqueurs, le sujet est instruit sur le mouvement selon les indications suivantes :

1. Donne de balle à partir d'un tube incliné avec marque au sol pour le rebond
2. Effectuer des coups droits de puissances moyennes
3. Liberté restreinte dans la position de départ (Zone délimitée)
4. Cibler la bache avec une liberté totale les zones d'impacts (sauf lors du test)

	Experts	Groupe Raquette	Groupe Squelette	Groupe Mix
Jour 1	Accueil Explications Enregistrement des 100 mouvements	Accueil Test 1 Entraînement 1	Accueil Test 1 Entraînement 1	Accueil Test 1 Entraînement 1
Jour 2		Test 2 Entraînement 2	Test 2 Entraînement 2	Test 2 Entraînement 2
Jour 3		Test 3 Entraînement 3	Test 3 Entraînement 3	Test 3 Entraînement 3
Jour 4		Test 4 Entraînement 4 Test 5	Test 4 Entraînement 4 Test 5	Test 4 Entraînement 4 Test 5
Jour 5		Test 6 Retention Questionnaire	Test 6 Retention Questionnaire	Test 6 Retention Questionnaire

Figure 8. Planification des séances pour les experts et les 3 groupes de sujets.

Procédure expérimentale. Afin que l'expérience se déroule du mieux possible, nous avons mis en place un déroulement précis et constant dans son exécution pour éviter tout biais procédural possible. Chaque passation s'est déroulée en suivant ces étapes :

1. Calibration des caméras (qualité minimum requise : Excellente)
2. Équipement du sujet et création du squelette dans la salle de capture
3. Assignment d'un expert grâce à Morphology.exe (Coplab)
4. Lancement de l'application Tennis.exe (Coplab) contenant le test et les différents feedbacks
5. Lier l'application Motive et Coplab grâce à la diffusion live de la position du squelette.
6. Échauffement (min. 5 frappes)
7. Déroulement des tests et entraînements

2.3.2 Entraînements. Afin que le sujet puisse montrer quelques signes d'adaptations, nous avons prévu un entraînement qui lui permet non seulement de recevoir un feedback régulier mais aussi de pouvoir s'exercer au coup droit en frappant un nombre de balles conséquent. De

ce fait, l'entraînement se compose de 10 à 12 séries de 4 à 5 frappes au terme desquelles il reçoit un feedback sur son dernier mouvement enregistré. La variabilité dans le nombre de série et de frappes dépend uniquement de la régularité et de la précision dans la capture des mouvements. En effet, il arrive que les caméras ne capturent pas le mouvement de façon assez précise pour donner un feedback correct au sujet. En revanche, nous avons veillé à ce que les sujets ne frappent pas plus de 60 balles par séance pour éviter des inégalités dans les entraînements. Il était du devoir des responsables de l'expérience de veiller à ce que chaque feedback soit cohérent et, dans le cas contraire, permettre au sujet d'effectuer autant de mouvements nécessaires à l'obtention de celui-ci. Durant ce feedback, le participant a pu s'exercer pendant 60 secondes sous différents angles de caméra (vue dorsale, vue plongeée et vue dorsale $\frac{3}{4}$) avant de passer à la série suivante. Tout au long de l'expérience, on a rappelé au participant qu'il devait varier ses positions de départ ainsi que ses directions de balles autant que possible. Le but de cette instruction est d'inciter le sujet à prendre le plus de contrôle possible sur l'expérience et de lui laisser une variabilité suffisante dans l'exécution de ses mouvements. Enfin, la projection de l'application Coplab est remplacée par une image d'un court de tennis vue en première personne durant toutes les frappes d'entraînements (Figure 9). Le but de cette image est de contextualiser ses frappes ainsi que de donner un repère réel lors de l'expérience



Figure 9. Image projetée par le beamer lors des entraînements.

2.3.3 Tests. Au début de chaque séance, le sujet a passé un test de précision qui est enregistré dans sa totalité. De plus, lors de la séance N°4, un 2^{ème} test (post-test) est effectué lors d'une même séance après l'entraînement. Tous les tests sont identiques : 10 frappes de précision

contre l'écran avec entre chaque frappe un déplacement de la cible (rond jaune de la taille d'une balle de tennis). Nous mesurons la distance entre la cible et l'impact de la balle lors de chaque frappe de façon manuelle à l'aide d'un double-mètre. Le reste du mouvement est enregistré à l'aide de l'application Motive et des caméras.



Figure 10. Projection du test avec la cible (rond jaune).

2.4 Analyse statistique

Chaque sujet a enregistré 60 mouvements. Le principe fondamental de notre analyse repose sur la comparaison des segments ou des angles du squelette entre un apprenant avec l'expert qui lui a été attribué. On obtiendra alors un score par rapport à la différence de distance entre le sujet et l'expert par rapport à une position spécifique ou une partie du mouvement isolée. Le score de précision obtenu lors des différents tests est aussi utilisé dans l'analyse.

En détail, les analyses ont été menées sur chaque donnée clé du mouvement (Appuis, Raquette, Poignet, Coude, Position Squelette, Rotation Squelette, Précision) lors de trois moments clés du mouvement (Préparation, Impact, Finition) et selon deux comparaisons temporelles différentes (entre pré-test et post-test, entre pré-test et test rétention).

Pour les cas paramétriques, nous avons utilisé le test de *student*. Dans le cas contraire, le test de *Wilcoxon* a été utilisé pour les mesures répétées (et lors d'absences d'homostadécité) et le test de *Welch* pour les mesures indépendantes.

3 Résultats

Au regard de la quantité importante de données obtenues grâce à la capture de mouvement, cette section ne présentera que les résultats contenant des tendances ou des valeurs significatives pour la discussion afin de ne pas surcharger le travail en tableaux superflus.

3.1 Données sur les mouvements virtuels

Tableau 1

Comparaisons des moyennes d'écarts de distance (entre le sujet et l'expert) avant (pre) et après (post) 4 sessions d'entraînements.

	Conditions mixtes (n=18)	Feedback Raquette (n=6)	Feedback Squette (n=5)	Feedback Mix (n=7)
Coude Préparation	Mpre=0.40 Mpost=0.35 t(17)=1.16 p=0.263	Mpre=0.43 Mpost=0.28 t(4)=1.64 p=0.162	Mpre=0.47 Mpost=0.43 t(4)=0.42 p=0.694	Mpre=0.34 Mpost=0.34 t(6)=-0.01 p=0.991
Coude Finition	Mpre=0.394 Mpost=0.34 t(17)=0.92 p=0.372	Mpre=0.25 Mpost=0.22 t(5)=0.43 p=0.68	Mpre=0.55 Mpost=0.39 t(4)=2.18 p=0.095	Mpre=0.40 Mpost=0.39 t(6)=0.03 p=0.98
Poignet Préparation	Mpre=1.18 Mpost=1.35 t(17)=-3.34 **p=0.004	Mpre=1.221 Mpost=1.32 t(5)=-1.92 p=0.113	Mpre=0.93 Mpost=1.24 t(4)=-2.91 *p=0.043	Mpre=1.32 Mpost=1.47 t(6)=-1.46 p=0.194
Poignet Impact	Mpre=1.46 Mpost=1.53 t(17)=-1.24 p=0.230	Mpre=1.52 Mpost=1.57 t(5)=-0.99 p=0.364	Mpre=1.32 Mpost=1.50 t(4)=-1.62 p=0.179	Mpre=1.52 Mpost=1.52 t(6)=-0.06 p=0.947

Note. Les couleurs se réfèrent à la progression (vert) ou la régression (rouge-orange) des sujets. L'encadrement indique seulement une tendance tandis que le remplissage (hormis gris pour la mise en valeur) met en avant une valeur significative. M=Moyenne. n=Nombre de sujets, *= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$.

Tableau 2

Comparaisons des moyennes d'écarts de distance (entre le sujet et l'expert) au premier test (pre) et au test de rétention (ret).

	Conditions mixtes (n=18)	Feedback Raquette (n=6)	Feedback Squelette (n=5)	Feedback Mix (n=7)
Coude Impact	Mpre=0.37 Mret=0.30 p=0.130(V=121)	Mpre=0.282 Mret=0.21 t(5)=1.89 p=0.117	Mpre=0.49 Mret =0.42 t(4)=1.07 p=0.345	Mpre=0.38 Mret=0.30 p=0.69(V=17)
Coude Finition	Mpre=0.39 Mret=0.32 p=0.167(V=118)	Mpre=0.25 Mret =0.21 t(5)=0.54 p=0.612	Mpre=0.55 Mret =0.30 t(4)=3.22 *p=0.032	Mpre=0.40 Mret =0.44 t(6)=-0.24 p=0.821
Poignet Préparation	Mpre=1.18 Mret=1.33 t(17)=-2.29 *p=0.0345	Mpre=1.22 Mret=1.26 t(5)=-0.39 p=0.71	Mpre=0.93 Mret=1.30 t(4)=-10.04 ***p<0.001	Mpre=1.32 Mret=1.41 t(6)=-0.75 p=0.482
Poignet Impact	Mpre=1.46 Mret=1.57 t(17)=-1.60 p=0.127	Mpre=1.52 Mret=1.64 t(5)=-1.01 p=0.358	Mpre=1.32 Mret=1.59 t(4)=-1.93 p=0.124	Mpre=1.52 Mret=1.50 t(6)=0.23 p=0.825
Raquette Impact	Mpre =0.69 Mret=0.57 t(17)=1.41 p=0.176 T	Mpre=0.649 Mret =0.49 t(5)=1.59 p=0.173 T	Mpre=0.96 Mret =0.59 t(4)=2.18 p=0.095	Mpre=0.53 Mret =0.63 t(6)=-0.87 p=0.418

Note. Les couleurs se réfèrent à la progression (vert) ou la régression (rouge-orange) des sujets. L'encadrement indique seulement une tendance tandis que le remplissage (hormis gris pour la mise en valeur) met en avant une valeur significative. M=Moyenne. n=Nombre de sujets, *=p<0.05, **=p<0.01, ***=p<0.001.

3.2 Données sur le score de précision

Tableau 3

Comparaisons des moyennes et des médianes de scores de précision entre le premier test (pre) et les deux derniers tests (post et ret)

	Conditions mixtes (n=18)	Feedback Ra- quette (n=6)	Feedback Squelette (n=5)	Feedback Mix (n=7)
Précision Médiane Pré-test/Post-test	Mpre=58.97 Mpost=36.83 ***p<0.001 (V=164)	Mpre=65.67 Mpost=31.33 *p=0.031(V=21)	Mpre=54.3 Mpost=38.7 t(4)=1.24 p=0.283	Mpre=56.57 Mpost=40.21 t(6)=4.90 **p=0.003
Précision Médiane Pré-test/Rétention	Mpre=58.97 Mret =44.33 p=0.074(V=127)	Mpre=65.67 Mret =35.25 p=0.094(V=19)	Mpre=54.3 Mret =36.2 t(4)=2.03 p=0.113	Mpre=56.57 Mret =57.93 t(6)=-0.14 p=0.89
Précision Moyenne Pré-test/Post-test	Mpre=60.18 Mpost=40.95 **p=0.002(V=153)	Mpre= 65.3 Mpost= 36.32 p=0.063(V=20)	Mpre=56.88 Mpost=42.4 t(4)=0.99 p=0.378	Mpre=58.16 Mpost=43.89 t(6)=3.28 *p=0.017
Précision Moyenne Pré-test/Rétention	Mpre=60.18 Mret =46.92 p=0.067 (V=128)	Mpre=65.3 Mret =38.63 p=0.156(V=18)	Mpre=56.88 Mret =40.26 t(4)=1.71 p=0.163	Mpre=58.16 Mret =58.77 t(6)=-0.07 p=0.939

Note. Les couleurs se réfèrent à la progression (vert) ou la régression (rouge-orange) des sujets. L'encadrement indique seulement une tendance tandis que le remplissage (hormis gris pour la mise en valeur) met en avant une valeur significative. M=Moyenne. n=Nombre de sujets, *=p<0.05, **=p<0.01, ***=p<0.001.

4 Discussion

Avant toute interprétation des résultats, rappelons les hypothèses émises auparavant :

Hypothèse H0 : Les feedbacks associés au focus d'attention et à la réalité virtuelle présentes des résultats cohérents avec les recherches précédentes (i.e. un focus d'attention externe produira de meilleurs effets sur l'apprentissage par rapport au focus interne).

Hypothèse H1 : Le feedback varié (Mix) permet une meilleure progression que les autres feedbacks simples (Raquette et Squelette).

Hypothèse H2 : Les scores de précisions des sujets vont s'améliorer globalement.

4.1 Interprétation des données virtuelles

L'analyse des Tableaux 1 et 2 nous permet de mettre à l'épreuve nos hypothèses (H0 et H1). Les résultats ne montrent pas de tendance significative globale particulière par rapport à l'effet des différents feedbacks sur l'apprentissage. On ne peut donc pas conclure que l'apprentissage en réalité virtuelle reporte les effets bien connus des théories d'apprentissage moteur concernant le focus d'attention. De même, aucun feedback ne se démarque comme généralement meilleur ou moins bon qu'un autre. Cependant, quelques tendances discrètes ont été observées.

Les sujets ayant reçu le feedback Squelette présentent des résultats ambigus mais significatifs du point de vue de l'analyse. On observe tout d'abord une amélioration des sujets concernant la position du coude lors de la finition du mouvement (cf. tableau 2). Une explication intuitive est que le groupe Squelette est le seul groupe à avoir reçu des informations répétées sur cette zone via le feedback. De façon contradictoire, le même groupe Squelette montre une baisse de performance très significative (cf. tableau 1 et 2) au niveau de la position du poignet lors de la préparation du mouvement. Une interprétation possible de ce résultat est le manque d'information liée au poignet dans le feedback Squelette. Comparée à l'articulation du coude, la précision de la représentation du poignet est très faible (Figure 6) et a donc pu handicaper les sujets. Au contraire, les groupes Mix et Raquette ont pu recevoir indirectement des informations sur cette partie à l'aide de la modélisation de la raquette et ne présentent donc pas de baisse de performance significative. Le groupe Mix a aussi reçu partiellement les mêmes informations que le groupe Squelette mais à cause de la variabilité des différents feedbacks inhérents à ce groupe, ils ne l'ont pas reçu assez souvent pour montrer les mêmes adaptations (que ce soit au niveau du coude ou du poignet). Dans le cadre de cette étude, la variabilité du feedback est donc à

double tranchant comme elle a permis d'éviter une régression dans la position du poignet mais elle a aussi empêché de profiter de l'amélioration de la position du coude. Ces adaptations des sujets dans le groupe Squelette montrent que la qualité de la représentation du corps dans un feedback visuel influence la progression dans l'apprentissage. Ces résultats peuvent être mis en relation avec les théories sur le focus attentionnel et son effet sur l'apprentissage (Wulf, 2013). Ces conclusions contradictoires sont bien entendues en désaccord avec l'état de la recherche. Nos hypothèses H0 et H1 sont donc réfutées de ce point de vue, mais la possibilité de développer l'apprentissage moteur en réalité virtuelle sera explorée plus tard dans la discussion. Concernant les autres tendances isolées soulevées dans les tableaux 1 et 2, elles ne font que montrer un nombre de sujet trop faible pour que des conclusions fiables soit tirées.

4.2 L'évolution des scores de précision selon les groupes

A partir du tableau 3, on observe une amélioration significative de la précision des groupes Raquette et Mix entre le pré-test et le post-test (Figure 11). Plus particulièrement, les résultats montrent meilleure constance de la performance grâce à une réduction des valeurs extrêmes (analyse de la médiane des scores de précision cf. tableau 3).

Ces résultats sont en accord avec les théories sur le focus attentionnel. Le groupe Raquette (Focus externe) a mieux progressé en précision que le groupe Squelette (Focus Interne) comme déjà observé par Wulf (2013). Le groupe Mix s'est lui aussi amélioré non seulement au niveau de la médiane des résultats mais aussi de la moyenne contrairement aux autres groupes. Si l'on ne considère que la précision, nos hypothèses H0 et H1 concordent alors avec nos résultats. Un focus attentionnel externe aura donné de meilleurs résultats qu'un focus interne et le feedback varié est une meilleure option qu'un feedback simple.

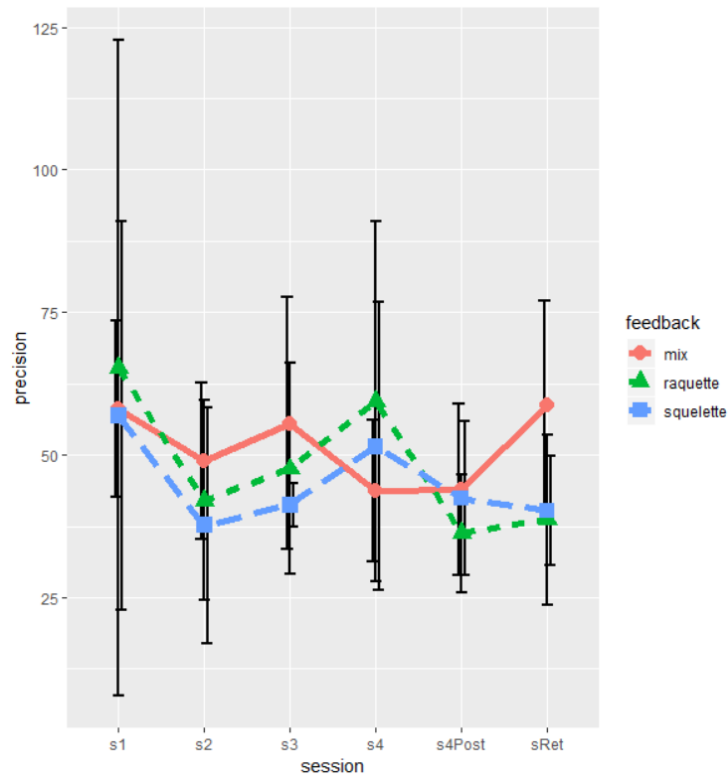


Figure 11. Evolution du score de précision au cours des différentes séances et selon les différents groupes.

4.3 Limites et biais de cette expérience

Le facteur limitant principal de notre expérience est le nombre de sujets qui y ont participé. Cette restriction numérique ne nous permet pas de faire de comparaisons globales entre les groupes et nous autorise seulement à relever certaines tendances d'amélioration/régression. Plusieurs données d'analyses montrent une tendance qui peut être significative si le nombre de sujets double (cf. tableau 1, 2 et 3). À ce sens et pour de futures recherches, le nombre de sujets par groupe devra être au minimum de 12 afin de maximiser le potentiel des analyses. Une autre restriction fut celle des experts exploitables durant cette expérience. Sur les 7 modèles du départ, il ne resta que 2 experts utilisables dont *Alain* qui fut assigné à 90% des sujets par l'application *Morphology.exe*. Ce choix de modèle reste donc très arbitraire et donc peu profitable au développement correct d'une méthode d'apprentissage par démonstration efficace comme le dit Desmurget (2006).

Les résultats ne sont pas homogènes entre la qualité technique (analyse virtuelle) et la précision (analyse du score). Malgré des conditions d'apprentissage similaires, on soulève une distinction dans l'intention du mouvement dans l'apprentissage et le test. Pendant l'entraînement, le sujet a la possibilité de varier son mouvement et aucune restriction de cible ne lui est donnée afin

qu'il puisse s'exercer de la façon la plus libre possible. Le fait de tester son mouvement par un score de précision peut alors induire une interférence dans son exécution technique. Il serait bon aux futures recherches d'inclure une analyse de mouvement sans contrainte afin de pouvoir analyser purement la progression technique du sujet.

L'exploitation des conditions optimales de l'environnement virtuel furent limitées à plusieurs points de vue. Le rapport à la réalité censé favoriser le transfert des adaptations n'était présent que sous la forme d'une projection murale (Figure 9) et de matériel cohérent à la tâche (raquette et balles). L'interactivité de l'utilisateur avec son environnement était elle-aussi sous-représentée avec une forme de liberté dans les conditions d'apprentissage (zone de départ et zone d'impact) et non une réelle influence de l'utilisateur sur son espace d'action.

4.4 Ouverture pour les futures recherches

Les systèmes de simulation virtuelles de sport reçoivent déjà des avis très positifs de leurs utilisateurs comme dans le « Tennis Cave » de Xu et al. (2010). Cependant, l'apprentissage moteur dans un environnement virtuel reste compliqué et soumis à plusieurs restrictions. Dans une optique de transfert dans un espace réel, cette étude n'a aucune légitimité. Cependant, elle permet d'analyser l'apprentissage d'une nouvelle habileté motrice complexe à l'aide d'une technologie de réalité augmentée. Malgré le nombre de sujets faible, le peu de résultats qui ressortent de cette étude montre que la réalité virtuelle est un outil, certes complexe, mais très riche pour les futures recherches dans l'apprentissage moteur.

Comme énoncé dans l'introduction, les deux principaux avantages d'un environnement virtuel sont la création de conditions modulables et la collecte de données importantes et précises. Ces forces n'en sont vraiment que si plusieurs conditions sont respectées. Tout d'abord, ce qui a le plus manqué à cette étude, un nombre de sujets important pour pouvoir faire sens à cette masse d'information collectée. Ensuite, la création de conditions cohérentes, tant par rapport à la réalité, mais aussi selon ce que l'on veut observer. La différence entre nos conditions d'apprentissage et de test illustre cela. Enfin, l'interactivité avec l'utilisateur doit être développée. L'environnement virtuel doit à ce sens plus ressembler à un terrain de jeu vidéo. Un espace où le sujet peut interagir fortement mais selon des règles qui profitent à l'expérience et qui ne nuisent pas au développement des habiletés du participant (comme un joueur qui évolue dans un niveau).

Notre étude est essentiellement basée sur l'apprentissage technique d'un mouvement complexe dans une situation libre mais peu variable. Il serait intéressant d'inclure un processus décisionnel dans l'apprentissage d'autant plus que le sport entraîné se situe dans la catégorie des sports téléo-cinétiques. En prenant le tennis comme exemple, le fait de présenter différents scénarios de jeu (et donc d'analyser la réponse motrice sur son efficacité technique et tactique) permettrait au sujet d'expérimenter une situation de tennis beaucoup plus proche de la réalité. De plus, cette forme de variabilité de situation est plus cohérente avec une forme de jeu que la liberté que l'on a donné au sujet lors de son apprentissage. Afin d'optimiser l'efficacité de cette forme d'apprentissage, le rôle d'un coach est aussi à ne pas négliger. Dans notre expérience, nous avons minimisé les instructions et l'intervention humaine. Le rôle d'un entraîneur est de donner les bonnes informations au bon moment et sous la bonne forme à son élève. Afin de ne pas tomber dans un apprentissage classique, il serait possible au coach de choisir le type de correction que reçoit son élève parmi une sélection de feedback virtuels. En ce sens, on place une décision humaine compétente, mais le feedback reste virtuel et donc riche en informations que pourra exploiter l'apprenant.

L'efficacité de l'apprentissage moteur en réalité virtuelle pour des sportifs chevronnés dans la discipline reste inconnu. Des sujets plus expérimentés demandent une simulation plus avancée de la discipline afin d'analyser plus en détail et en profondeur les mouvements et les situations liés à la tâche. De ce fait et par définition, ce type d'apprentissage paraît plus difficile à mettre en place. Il en va de même pour les méthodes de simulation immersive qui ont déjà été récemment explorée dans la danse (Chan, Leung, Tang et Komura, 2011) et les arts martiaux (Burns, 2013). Les méthodes et les technologies inhérentes à la virtualisation du mouvement sont encore neuves, mais on peut espérer dans un prochain avenir, une accessibilité renouvelée et une mise en place moins coûteuse des installations ce qui pourraient accélérer la recherche dans ce sens. Le simple fait de pouvoir amener une technologie de réalité augmentée sur un terrain de tennis existe déjà sous la forme de raquette connectée (Babolat Play Pure Drive). Grâce à cet équipement et une simple application mobile (Babolat Play), on peut recevoir des données fiables et précises sur la puissance, la rotation de la balle, la précision de frappe ou encore la vitesse de balle au service. Le développement de l'accessibilité de ce genre de technologie est donc à mettre au centre de la recherche.

5 Conclusion

Notre travail sur l'apprentissage d'un mouvement complexe à l'aide de technologie de réalité augmentée nous a permis d'expérimenter l'efficacité des feedbacks et du focus d'attention avec un environnement virtuel. Malgré des résultats peu nombreux, nous avons pu mettre en évidence une amélioration de performance au niveau de la précision qui concorde avec les recherches actuelles d'apprentissage moteur. De plus, l'établissement de cet environnement virtuel nous a permis d'identifier des notions clés comme la concordance visuelle du feedback ou encore l'importance de l'interactivité avec l'utilisateur.

Cette étude se situe dans la ligne de recherche des théories d'apprentissage en réalité virtuelle et fournit une base empirique pour de futures recherches plus ou moins liées à celle-ci. Les applications utilisées ainsi que les enseignements tirés de la création d'un espace d'action virtuel peuvent être utilisés par toute étude s'apparentant à la nôtre.

L'association des théories d'apprentissage moteur et de réalité virtuelle reste encore difficile. Notamment, l'aspect de la fidélité par rapport à la réalité est un immense challenge pour de futurs travaux. Cet article apporte une contribution, aussi fine soit-elle, à un domaine encore peu développé.

Références

- Atienza, F. L., Balaguer, I., & García-Merita, M. L. (2011). Video Modeling and Imaging Training on Performance of Tennis Service of 9- to 12-Year-Old Children. *Perceptual and Motor Skills*, 87(2), 519-529. <https://doi.org/10.2466/pms.1998.87.2.519>
- 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. <https://doi.org/10.1080/15213260802285214>
- Boyer, E., Miltenberger, R. G., Batsche, C., & Fogel, V. (2009). Video Modeling By Experts With Video Feedback To Enhance Gymnastics Skills. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 42(4), 855–860. <https://doi.org/10.1901/jaba.2009.42-855>
- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). *Virtual reality technology* (John Wiley & Sons).
- Burns, A. M. (2013). *On the Relevance of Using Virtual Humans for Motor Skills Teaching : A Case Study on Karate Gestures*. (Doctoral dissertation, Université Rennes 2).
- 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. <https://doi.org/10.1109/TLT.2010.27>
- Chiviacowsky, S., & Wulf, G. (2007). Feedback after good trials enhances learning. *Research quarterly for exercise and sport*, 78(2), 40-47. <https://doi.org/10.1080/02701367.2007.10599402>
- Desmurget, M. (2006). *Imitation et apprentissages moteurs: des neurones miroirs à la pédagogie du geste sportif*. Groupe de Boeck.
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Presses des MINES.
- Huang, D., Mao, Y., Chen, P., & Li, L. (2014). Virtual reality training improves balance function. *Neural Regeneration Research*, 9(17), 1628. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.141795>
- Huegel, J. C., & O'Malley, M. K. (2010). Progressive haptic and visual guidance for training in a virtual dynamic task. In *2010 IEEE Haptics Symposium*, (pp. 343-350). <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2010.5444632>
- Kal, E. C., Van Der Kamp, J., & Houdijk, H. (2013). External attentional focus enhances

- movement automatization: A comprehensive test of the constrained action hypothesis. *Human Movement Science*. 32(4), 527-539. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.04.001>
- Kasper, R. W., Elliott, J. C., & Giesbrecht, B. (2012). Multiple measures of visual attention predict novice motor skill performance when attention is focused externally. *Human Movement Science*. 31(5), 1161-1174 <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.11.005>
- Kelly, P., Healy, A., Moran, K., & O'Connor, N. E. (2010). A virtual coaching environment for improving golf swing technique. In *Proceedings of the 2010 ACM workshop on Surreal media and virtual cloning* (51-56). ACM. <https://doi.org/10.1145/1878083.1878098>
- Lohse, Keith R. (2012) *The Role of Attention in Motor Learning and Control*. Psychology and Neuroscience Graduate Theses & Dissertations. 25
- McCullagh, P. (2016). Model Similarity Effects on Motor Performance. *Journal of Sport Psychology*. 9(3), 249-260. <https://doi.org/10.1123/jsp.9.3.249>
- Meaney, K. S. (1994). Developmental modeling effects on the acquisition, retention, and transfer of a novel motor task. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 65(1), 31-39. <https://doi.org/10.1080/02701367.1994.10762205>
- Miles, H. C., Pop, S. R., Watt, S. J., Lawrence, G. P., & John, N. W. (2012). A review of virtual environments for training in ball sports. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 36(6), 714–726. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.04.007>
- Porter, J., Makaruk, H., & Starzak, M. (2016). The Role of Vision and Movement Automization on the Focus of Attention Effect. *Journal of Motor Learning and Development*. 4(2), 152-168. <https://doi.org/10.1123/jmld.2015-0020>
- Rizzolatti, G. (2006). Les systèmes de neurones miroirs. *Paper delivered at the Paris Academy of Sciences, December, 12*, 1371-1381.
- Schmidt, R., & Wrisberg, C. (2008). *Motor learning and performance: A situation-based learning approach*. Human kinetics.
- Shea, C. H., Wright, D. L., Wulf, G., & Whitacre, C. (2000). Physical and observational practice afford unique learning opportunities. *Journal of Motor Behavior*. 32(1), 27-36. <https://doi.org/10.1080/00222890009601357>
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and

- multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin and Review*. 01. 20(1), p. 21-53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
- Slater, M., Steed, A., & Chrysanthou, Y. (2003). *Computer graphics and virtual environments: from realism to real-time*. Pearson Education.
- 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), 243-252 <https://doi.org/10.1162/pres.19.3.243>
- Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning: A review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 6(1), 77–104. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2012.723728>
- Wulf, G., Chiviacowsky, S., Schiller, E., & Ávila, L. T. G. (2010). Frequent external-focus feedback enhances motor learning. *Frontiers in Psychology*. 1, 190. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00190>
- Wulf, G., Höß, M., & Prinz, W. (1998). Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention. *Journal of Motor Behavior*, 30(2), 169–179. <https://doi.org/10.1080/00222899809601334>
- Wulf, G., McConnel, N., Gärtner, M., & Schwarz, A. (2002). Enhancing the learning of sport skills through external-focus feedback. *Journal of Motor Behavior*. 34(2), 171-182 <https://doi.org/10.1080/00222890209601939>
- Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*. 54(4), 1143-1154. <https://doi.org/10.1080/713756012>
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin and Review*. 9(2), 185-211. <https://doi.org/10.3758/BF03196276>
- Wulf, G., Shea, C., & Lewthwaite, R. (2010). Motor skill learning and performance: A review of influential factors. *Medical Education*. 44(1), 75-84 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2009.03421.x>

- Wulf, G., Töllner, T., & Shea, C. H. (2007). Attentional focus effects as a function of task difficulty. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 78(3), 257-264
<https://doi.org/10.1080/02701367.2007.10599423>
- Xu, S., Song, P., Chin, C. L., Chua, G. G., Huang, Z., & Rahardja, S. (2010). Tennis space: An interactive and immersive environment for tennis simulation. *Proceedings of the 5th International Conference on Image and Graphics, ICIG 2009*, 652–657.
<https://doi.org/10.1109/ICIG.2009.102>
- Zetou, E. (2005). Modeling in learning two volleyball skills. *Perceptual and Motor Skills*.
<https://doi.org/10.2466/pms.94.4.1131-1142>

Annexes

1. Equipement de capture



Figure 12. Balles et raquette équipées de capteurs réfléchissants



Figure 13. Tube incliné utilisé pour la distribution de balle

2. Déclaration de consentement

Formulaire de consentement aux sujets pour participer à l'étude observationnelle :

ANALYSE DE FEEDBACK AU COUP DROIT AU TENNIS

Madame, Monsieur,

Je soussigné certifie :

- Avoir compris et accepté les informations données sur l'expérience par Lionel Lugon et Fanny Mauron.
- Que j'ai pu poser toutes les questions souhaitées et que j'ai reçu des réponses satisfaisantes.
- Être informé que je peux me retirer à tout moment de l'étude et sans préjudice.
- Être informé que toutes les données personnelles, résultats obtenus à mon sujet et ma participation à l'étude sont confidentiels et ne seront disponibles qu'aux chercheurs directement impliqués dans cette étude.
- Être informé que les résultats obtenus lors de l'étude seront publiés de manière anonyme, et sous une forme qui ne peut pas m'identifier, dans une ou plusieurs publications scientifiques. J'y ai donné mon accord.
- Consentir à participer volontairement à l'étude susmentionnée comme sujet.

Sujet de l'étude

Nom et prénom :

Date et signature :

Personne ayant conduit l'entretien de consentement

Je confirme avoir personnellement expliqué au sujet désigné ci-dessus la nature, le but, la durée, les effets et risques prévisibles de l'étude

Nom et prénom :

Date et signature :
