

Le feedback vidéo dans l'apprentissage moteur

Apprentissage de la rondade par feedback délayés

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

déposé par
Chiara Rè

à
l'Université de Fribourg, Suisse
Faculté des sciences
Département de médecine

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent
Prof. Dr. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller
Prof. Thibaut Le Naour

Fribourg, Juillet 2017

Table des matières.....	2-3
I. Résumé.....	4
II.Introduction.....	5-6
III. Partie théorique.....	7-37
A. Les notions nécessaires à la compréhension de notre contexte.....	7-29
1. Les notions pédagogiques.....	7-12
1.1Innovations pédagogiques.....	7
1.2 Rôle de l'enseignant.....	7-8
1.3 Rôle de l'apprenant.....	8
1.4 Métacognition.....	8-9
1.5 Autoévaluation.....	10
1.6 Autorégulation.....	10-11
1.7 Relation pédagogique.....	11-12
2. Les notions d'apprentissage et d'apprentissage moteur.....	12-20
2.1 Définition et introduction.....	12-16
2.2 Théories du contrôle moteur.....	16-19
2.2.1 Théorie de la boucle fermée d'Adams (1971).....	16-17
2.2.2 Théorie du schéma de Schmidt (1975).....	17-19
2.3 Méthodes d'apprentissage.....	19-20
2.3.1 Apprentissage par imitation.....	19
2.3.2 Apprentissage par observation.....	19-20
2.3.3 Autres méthodes.....	20
3. La notion de feedback.....	21-29
3.1 Définition, types et caractéristiques.....	21-22
3.2 Feedback vidéo.....	23
3.3 Feedback vidéo virtuel interactif.....	23-24
3.4 Etat des travaux préliminaires.....	25-29
B. Le mouvement choisi – la rondade.....	29-37
4. Explication, décomposition et analyse du mouvement.....	29-34
5. Suite méthodologique : de la roue, à la roue ¼ de tour, à la forme finale.....	34-36
6. Les critères pour une bonne exécution.....	36-37
IV. Partie pratique-expérimentale.....	37-56
7. But et hypothèse de recherche.....	37-38

8. Méthode et plan d'expérience.....	39-43
9. Résultats.....	44-53
9.1 Analyses biomécaniques.....	44-50
9.2 Evaluation des juges.....	50-54
10. Discussion.....	55-57
V. Critiques.....	57-58
VI. Conclusion.....	59-61
VII. Sources	62-67
11. Bibliographie.....	62-65
12. Sitographie.....	65-67
VIII. Annexes.....	68-73
IX. Remerciements.....	74

I. Résumé

Ce travail a comme but d'investiguer l'utilité de feedback vidéo et virtuels dans l'apprentissage moteur. Grace au développement technologique des dernières années, les personnes sont toujours plus habituées à utiliser les technologies, surtout les jeunes. Alors, pourquoi ne pas intégrer cet aspect dans l'apprentissage moteur ? Que ce soit à l'école durant les cours d'éducation physique ou pendant les entraînements sportifs en club, le feedback vidéo peut être un aide précieux pour rendre plus conscients les apprenants de ce qu'ils font réellement et donc pour apprendre plus facilement. Ce travail veut surtout investiguer un nouveau type de feedback vidéo, que nous appellerons feedback vidéo virtuel interactif (FVVI) : une reconstruction en 3d grâce à un avatar (en réalité virtuelle) d'un sujet exécutant un mouvement. Ce feedback permet de superposer le mouvement du sujet avec celui d'un expert de la gestuelle. Il y a donc une comparaison directe avec le mouvement référence, ce qui permet de faire émerger les erreurs principales en temps réel.

Dans notre expérience, quatre types de feedback différents sont proposés aux participants : vidéo normale de l'expert, vidéo 3d de l'expert, vidéo 3d de l'expert superposé au sujet dans les plans sagittal et frontal et vidéo de l'expert superposé au sujet avec la possibilité d'exploiter tous les angles de vue. Le but est justement de savoir lequel est plus bénéfique pour l'apprentissage et l'amélioration de la rondade, élément gymnique au sol. L'accent, comme déjà dit, est posé sur les deux conditions en réalité virtuelle avec superposition.

Les résultats montrent que d'un point de vue biomécanique (au niveau des angles des segments du corps, analysés grâce à une application), il y a eu une baisse de qualité du mouvement, mais que selon l'évaluation subjective des juges (perception humaine) il y a eu une amélioration significative entre pré- et post-test pour trois conditions. Il faut noter que dans les analyses biomécaniques, le dynamisme n'a pas été pris en compte. On n'a pas obtenu des résultats significatifs en ce qui concerne la différence entre les 3 méthodes qui se sont révélés positifs en termes d'apprentissage. Seulement avec un test post-hoc, l'amélioration résultante de la condition superposition 3d sagittal frontal est significativement plus importante que celle de la condition 3d expert (la seule méthode qui n'a pas montré une amélioration significative).

II. Introduction

Dans la société d'aujourd'hui, on est habitué à utiliser différentes technologies dans la vie de tous les jours. Les jeunes, en particulier, ont une facilité innée et un grand intérêt à utiliser ordinateurs, *smartphones*, jeux vidéo, etc. Alors, pourquoi ne pas intégrer la technologie dans les cours d'éducation physique à l'école ou pendant les entraînements sportifs? Cette méthodologie s'est beaucoup développée dans les dix dernières années grâce à l'utilisation massive de téléphones dotés d'un appareil photo assez performant et à la création d'applications comme *Ubersense*, *Coach's Eye* ou *Dartfish Express*. Le fait de pouvoir être filmé pendant l'exécution d'un mouvement et de pouvoir se revoir est une grande source d'information, qui peut aider à comprendre où se situent les erreurs d'exécution et donc à s'améliorer. C'est ce que l'on appelle le feedback vidéo.

De nombreuses études sont effectuées pour mieux comprendre les apports du feedback vidéo. Ces études visent par exemple à identifier le type de feedback le plus bénéfique (total, relatif, moyenné, atténué, simultané, différé, délayé, online, ou offline) ou encore la fréquence optimale de visualisation. Une multitude de sports et gestuelles différentes ont été analysées, avec des participants d'âges et de niveaux d'expertise différents et une grande variété de technologies a été utilisée pour filmer le mouvement (vidéo normale, séquence de photogrammes, slow motion, applications avec possibilité de dessiner des lignes et des autres outils sur l'image,...). Toutes ces variables ont été étudiées pour avoir un aperçu complet sur les bénéfices du feedback vidéo dans des situations très variées. Toutefois, la vidéo se limite à de la 2d, souvent utilisée par les expérimentateurs sur le plan sagittal ou frontal. A travers la capture de mouvements (visualisation 3d du mouvement), nous utiliserons dans notre étude un feedback plus récent, que nous appelons feedback vidéo virtuel interactif (FVVI). Il s'agit de l'utilisation de la réalité virtuelle pour avoir un feedback de qualité en trois dimensions. On utilisera un logiciel appelée *Motive* pour créer les squelettes 3D et une application appelée *Skeleton Player* pour rejouer les feedbacks en 3D. Notre expérience portera principalement sur ce type particulier de feedback. Quelques études ont déjà été conduites aussi sur ce nouveau type de feedback, dans le chapitre 3.4 *Etat des travaux préliminaires*, nous vous en présentons quelques-uns selon nous intéressantes par rapport à la nôtre, ce qui nous permet d'avoir un *background* solide et au même temps d'orienter notre recherche vers une perspective innovatrice.

Comme future professeur d'éducation physique, je souhaitais étudier à travers mon travail de master l'aspect de l'apprentissage moteur. En étant très intéressée par la gymnastique aux agrès et par la technologie, j'ai pensé avec mes responsables unir tous ces aspects pour créer une recherche dans le domaine de la perception et du contrôle moteur. Le but était de voir, si ce feedback est vraiment utile dans l'apprentissage moteur et en quelle mesure serait-il possible de l'intégrer dans les écoles durant les cours d'éducation physique comme outil pédagogique.

Le travail est composé de deux grandes parties : une théorique et une pratique. La théorie s'articule en plusieurs chapitres : un sur les notions pédagogiques liées à notre contexte, un dédié à l'apprentissage moteur, un sur les différents types de feedback (avec un éventail des travaux précédents sur cette thématique) et un sur le mouvement choisi : la rondade. Avec ces différentes parties, nous voulons vous donner un aperçu complet de tous les éléments de fond liés à notre travail, dans le but de pouvoir comprendre au mieux la deuxième partie : notre expérience en laboratoire, le vrai travail de recherche. La partie expérimentale s'articule en plusieurs chapitres : but et hypothèse de recherche, méthode et plan d'expérience, résultats et discussion. Avant de ponctuer le travail avec une conclusion générale (sur la situation actuelle et sur les perspectives futures), il y a une partie appelée *critiques* qui nous servira de bilan sur notre étude.

III. Partie théorique

A. Notions nécessaires à la compréhension de notre contexte

1. Les notions pédagogiques

Dans cette partie, nous présentons les principales notions pédagogiques qui concernent l'éducation physique et plus précisément aussi le contexte pédagogique reconstruit en laboratoire à travers notre expérience. Nous allons parler de la redéfinition des rôles d'enseignant et d'apprenant due aux innovations pédagogiques des dernières années. Nous parlerons de métacognition, autoévaluation et autorégulation ; processus mis en place par les élèves durant l'utilisation d'un feedback vidéo. Et nous terminerons par définir la *relation pédagogique*.

1.1 Innovations pédagogiques

L'enseignement classique ou frontal (situation où le professeur explique et les élèves écoutent) est toujours de moins en moins utilisé dans les écoles. Des nouveaux outils pédagogiques permettent d'enseigner de manière plus interactive, variée et efficace. L'élève ne se limite plus seulement à écouter mais joue un rôle plus actif dans son apprentissage. Un de ces nouveaux outils dans l'éducation physique est la vidéo. Le fait de se voir exécuter un mouvement rend les élèves totalement conscients de leurs actions et leur donne la possibilité de comparer leur représentation interne (souvent trompeuse) avec un feedback externe (représentation réelle). L'apprentissage à travers des feedbacks vidéo permet à l'élève de s'engager personnellement dans la construction de son apprentissage et de développer certaines capacités cognitives retenues fondamentales pour la formation des élèves en tant que citoyens : la métacognition, l'autoévaluation et l'esprit critique. Nous en parlerons plus dans le détail dans les prochains paragraphes.

1.2 Rôle de l'enseignant

Comme déjà mentionné plus haut, les nouvelles perspectives pédagogiques ont progressivement porté à un changement de rôle de la part de l'enseignant. Il n'est plus vu comme « dépositaire absolu de connaissance » mais plutôt comme « guide proactif »¹. Son rôle est de guider les élèves vers la connaissance. A travers la vidéo, l'enseignant fournit aux élèves une nouvel-

¹ <http://www.ilsileno.it/2013/01/20/il-nuovo-ruolo-del-docente-da-depositario-assoluto-del-sapere-a-guida-propositiva/> (18.04.2017)

le source d'information alternative à ses mots (corrections verbales). Cette source nécessite une analyse attentive pour être efficacement exploitée. L'enseignant joue dans ce cas aussi le rôle de guide, pour aider les élèves dans la correcte exploitation d'informations de la vidéo et pour après les laisser travailler seuls. Il leur donne les outils (et les outils pour utiliser l'outil), c'est à eux d'apprendre !

Le professeur peut, en utilisant des applications avec visualisation décalée, corriger l'élève tout de suite verbalement et après le laisser aller se voir et s'analyser tout seul. On a deux feedbacks complémentaires : verbal et vidéo. Ainsi faisant, le professeur peut mieux se concentrer sur chaque élève individuellement, sur des élèves qui ont des difficultés majeures en laissant travailler les autres librement ou sur la gestion générale de la classe et le bon déroulement du cours.

1.3 Rôle de l'apprenant

Avec les nouvelles perspectives pédagogiques aussi le rôle de l'élève est redéfini. Avant, il était plutôt considéré comme un « récepteur passif d'informations », maintenant il est un « constructeur actif de connaissance »². Il doit être dans la mesure de développer son esprit critique, de se questionner continuellement, de proposer, de découvrir (buts formatifs de l'école). Pour ce qui concerne l'éducation physique, l'apprenant doit chercher à faire le plus d'expériences possibles, de pratiquer, répéter et finalement consolider. C'est la seule manière pour progresser. La source vidéo peut être, dans différentes gestuelles motrices à apprendre, une aide précieuse pour comprendre ses propres fautes et chercher à les corriger. En plus, les jeunes d'aujourd'hui sont enthousiastes lorsqu'il s'agit de technologie. Alors pourquoi ne pas utiliser cet aspect pour augmenter la motivation pour l'activité ? Si la motivation augmente, aussi la réussite et l'amélioration auront la tendance à croître !

1.4 Métacognition

La métacognition est étudiée depuis l'antiquité. Socrate avec les mots « connais-toi toi-même »³ a déjà posé les bases de ce concept théorique. Seulement dans les années 1970, il y a

² <http://www.ilsileno.it/2013/01/20/il-nuovo-ruolo-del-docente-da-depositario-assoluto-del-sapere-a-guida-propositiva/> (18.04.2017)

³ Cette phrase n'est pas exactement de Socrate, c'est une devise inscrite au frontispice du Temple de Delphes qu'il reprend à son compte.

eu une vraie théorisation de la métacognition avec Flavell⁴, qui dit que la métacognition est la connaissance de ses propres processus cognitifs, de leur évaluation active, de leur régulation et de leur organisation. Ces actions sur les processus cognitifs se font habituellement dans la poursuite d'un but ou d'un objectif concret (Flavell, 1976).

Comme le disent Gros et Clerc (2013), la vidéo est prédestinée à être métacognitive car elle engendre chez l'élève un centrage sur son processus d'apprentissage. La vidéo permet à l'élève de se responsabiliser, de devenir autonome, de choisir ce qui est meilleur pour lui, d'intégrer, de transférer et de consolider encore plus efficacement son savoir.

Dans la *figure 1* ci-dessous, tirée de Mauroux *et al.* (2013, p. 7), vous trouvez un résumé du processus métacognitif, articulé en trois phases.

Préparation	Performance	Évaluation
<ul style="list-style-type: none"> – Se fixer des buts, – Planifier ses actions de manière stratégique – Se focaliser sur l'intérêt intrinsèque de l'activité – Se persuader d'être capable de réussir 	<ul style="list-style-type: none"> – Conduire la stratégie décidée, – Faire usage de stratégies d'autoguidage, de contrôle des résultats intermédiaires (monitorage) (debugging) (recherche d'aide) – Contrôler ses émotions et sa motivation – Diriger son attention sur les points importants – Auto-observation, recherche d'aspects spécifiques concernant sa propre performance 	<ul style="list-style-type: none"> – Evaluer la manière dont la tâche a été accomplie – Autoévaluer son degré de satisfaction, – Estimer les adaptations à faire dans sa procédure pour une prochaine fois

(Adapté de Zimmerman, 2000)

Figure 1. Tableau récapitulatif du processus métacognitif (Mauroux *et al.*, 2013, p. 7).

Wolfs (1992) distingue plutôt ce processus en trois autres phases :

1. La prise de conscience.
2. L'autoévaluation.
3. L'autorégulation.

Les deux chapitres suivants traitent plus dans le détail de l'autoévaluation et de l'autorégulation.

⁴ John H. Flavell est un psychologue américain qui s'est beaucoup occupé du développement cognitif des enfants.

1.5 Autoévaluation

Avec autoévaluation nous entendons la capacité à évaluer la distance entre *ce que je devrais faire* et *ce que je fais réellement*, et la capacité par la suite à prendre une décision à propos de cet écart (régulation). Le FVVI (conditions expérimentales 3 et 4), où le sujet se voit superposé à l'expert, correspond parfaitement à cette définition. Il nous permet de voir directement l'écart entre le *soll* (état désiré, expert) et le *ist* (état actuel, sujet), pour utiliser des termes germanophones qui expliquent bien le concept. Cette condition de feedback, utilisée dans notre expérience semble donc être la meilleure pour effectuer une autoanalyse parfaite. Les deux autres conditions aussi (vidéo normale et vidéo 3d de l'expert) permettent de s'auto-évaluer mais nous offrent seulement le modèle (*ce que je devrais faire*). Le sujet doit utiliser ses sensations/perceptions (en se créant un feedback interne) pour avoir une représentation dans sa tête à comparer avec la vidéo. Le processus d'évaluation est faisable mais sûrement plus compliqué et dur au niveau de l'intégration des informations.

L'autoévaluation, en termes pédagogiques, permet aux apprenants de :

- Développer l'esprit critique et la réflexion.
- Être autonomes.
- Être responsables.
- Comprendre comment juger les autres aussi (processus du comportement social).
- Avoir un nouveau regard sur eux-mêmes (processus de construction de soi).

L'autoévaluation peut être divisée en trois phases. L'*auto-observation*, qui consiste dans notre cas concret du FVVI de se voir sur l'écran de l'ordi. L'*auto-diagnostique*, qui permet d'interpréter son action. Et enfin l'*autorégulation*, une sorte de préparation à ajuster l'action lors de la prochaine exécution.

1.6 Autorégulation

Nous partons du schéma reporté dans la *figure 2* tiré de Mauroux *et al.* (2013, p. 9) pour définir et comprendre le processus d'autorégulation.

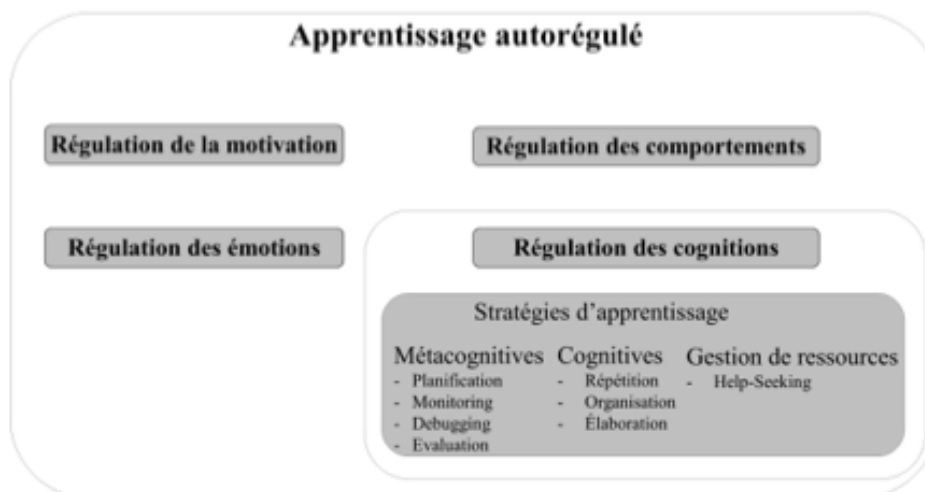


Figure 2. Schéma de l'apprentissage autorégulé (Mauroux *et al.*, 2013, p. 9).

Un apprentissage peut être qualifié « régulé » seulement s'il est intentionnel et dirigé vers un but. La régulation doit avoir lieu à différents niveaux : motivationnel, émotionnel, comportemental et cognitif. La partie cognitive est régulée grâce aux différentes stratégies d'apprentissage : *planification*, *monitoring*, *debugging*, *evaluation* (stratégies métacognitives), répétition, organisation, élaboration (stratégies cognitives), *help-seeking* (stratégie de gestion des ressources). Hadwin, Järvelä et Miller (2011) définissent l'autorégulation comme un processus métacognitif sur divers plans tels que cognitif, motivationnel, émotionnel et comportemental mis en place lors d'un apprentissage qui a un but précis.

L'autorégulation se fait donc consciemment et inconsciemment après visualisation du feedback vidéo, pour chercher à corriger les erreurs lors de la prochaine exécution. Pendant notre expérience, nous avons noté que les participants verbalisaient l'autorégulation pour se fixer de nouveaux objectifs pour le prochain block de pratique.

1.7 La relation pédagogique

Nous terminons cette première partie notionnelle avec un chapitre sur la relation pédagogique, « condition nécessaire de toute efficacité éducative » (Cosmopoulos ; 1999, p. 1). D'abord nous allons la définir, pour ensuite l'appliquer à notre contexte d'expérience (le FVVI).

La relation pédagogique selon Viau (1994) comprend trois pôles : enseignant, apprenant et matière/savoir, qui sont chacun reliés par des relations différentes : didactique, enseignement et apprentissage. Le schéma reporté dans la *figure 3* propose les trois pôles comme sommets

d'un triangle, et les trois relations comme les différentes facettes qui se créent en reliant les sommets⁵.

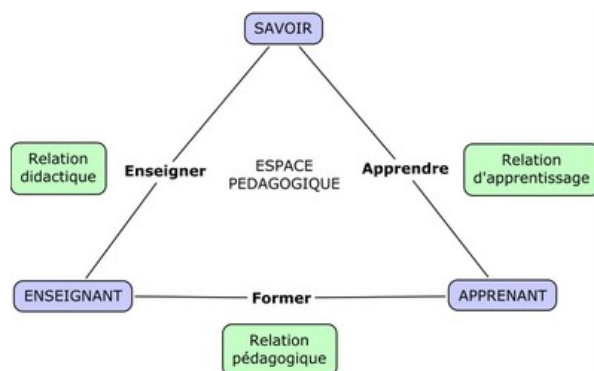


Figure 3. Schéma du triangle pédagogique de Jean Houssaye⁶.

Le FVVI influence sensiblement les trois relations. La relation didactique (entre l'enseignant et le savoir) est modifiée par l'utilisation de cet outil didactique novateur qui permet une approche différente, plus interactive avec le savoir. Aussi la relation entre professeur et élève (relation pédagogique) est influencée par l'utilisation du FVVI. L'élève se sent valorisé individuellement ; le professeur peut mettre en place une différenciation pédagogique pour tous les élèves; il y a plus d'échanges et de confiance mutuelle entre les deux parties. Pour terminer, la relation d'apprentissage (entre élève et savoir) est également positivement affectée par le FVVI. L'apprenant est plus actif dans la construction de son savoir et probablement plus motivé pour s'impliquer dans l'activité.

2. Les notions d'apprentissage et d'apprentissage moteur

2.1 Définition et introduction

Qu'est-ce que c'est un apprentissage? Selon le dictionnaire⁷, l'apprentissage est «une modification du comportement humain à travers l'expérience ». Si nous appliquons donc cette définition, dès notre naissance nous vivons dans un apprentissage continu tout au long de la vie. Nous apprenons à marcher, à parler, à lire, à écrire,... Chaque expérience avec l'environnement qui nous entoure nous amène à un apprentissage.

⁵ <http://sydologie.com/2013/10/pedagogie-et-andragogie-soyons-precis/> (21.04.2017)

⁶ Jean Houssaye est professeur en sciences de l'éducation à l'Université de Rouen.

⁷ [http://www.grandidizionari.it/Dizionario Italiano/parola/A/apprendimento.aspx?query=apprendimento](http://www.grandidizionari.it/Dizionario%20Italiano/parola/A/apprendimento.aspx?query=apprendimento) (12.04.2017)

Dans cette partie théorique, le focus sera surtout mis sur l'apprentissage *moteur*, vu que ce travail porte sur les sciences du mouvement et du sport, et plus précisément sur le domaine de la perception et du contrôle du mouvement.

Comme déjà mentionné, dès le plus jeune âge, nous sommes confrontés à des situations où pour s'adapter il faut apprendre quelque chose. Notre corps, à la naissance n'est pas encore totalement prêt à tout apprendre, mais grâce à la maturation des systèmes nerveux, squelettique et musculaire nous apprenons à bouger. Déjà avec des activités réflexes comme la succion et la rotation ciblée de la tête, les bébés s'adaptent au nouvel environnement et apprennent à satisfaire le besoin fondamental de se nourrir. L'apprentissage se fait donc naturellement pour nécessité. Deux autres réactions : le redressement de la tête-tronc et la marche automatique sont aussi des anticipations fonctionnelles des acquisitions qu'il y aura par la suite.⁸ Notre corps est en fait génétiquement programmé pour apprendre, il faut juste attendre l'état de maturation optimal.

La compétence motrice du bébé lui permet assez précocement d'établir des contacts sociaux avec son environnement et de faire les expériences perceptives nécessaires à son développement.⁹ Dans la première année de vie il y a une prolifération de connexions synaptiques, à 6 ans le volume du cerveau est déjà au 90%, tandis que celui du corps est encore au 50%. A 12 ans la myéline est complètement formée autour des axones (ce qui permet un traitement plus rapide des informations) et de 12 à 20 ans nous sommes dans une période dite de « haute plasticité cérébrale »¹⁰, où le principe *use it or lose it*¹¹ résume bien notre condition cérébrale. Notre cerveau apprend vite et consolide les gestes moteurs qu'on utilise/entraîne beaucoup et détruit les connexions synaptiques peu utilisées. C'est pour cette raison que nous avons plus de facilité à apprendre quand on est jeunes, que ce soit à l'école (apprentissages cognitifs) ou dans le sport (apprentissages moteurs). Il faut toutefois faire attention à ne pas vouloir surmonter le développement naturel du corps et du cerveau; par exemple Andersson (2014) a démontré que apprendre à nager à 3 ans nécessite 80 cours, tandis qu'à 8 ans il en faut seulement 20.

⁸ Notions prises d'un cours de Psychologie du développement, Prof. Camos, 2012, Université de Fribourg.

⁹ [http://www.treccani.it/enciclopedia/sviluppo-del-sistema-nervoso-nel-neonato_\(Dizionario-di-Medicina\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/sviluppo-del-sistema-nervoso-nel-neonato_(Dizionario-di-Medicina)/) (12.04.2017)

¹⁰ Notions prises d'un cours de Principes d'entraînement, Prof. Lüthi, 2017. Haute école fédérale du sport de Macolin.

¹¹ Principe illustré par Donald Hebb, psychologue et neuropsychologue canadien. Un des premiers scientifiques à approfondir le lien entre système nerveux et comportement.

Après avoir donné une définition de l'apprentissage, et une brève explication sur le développement du système nerveux qui permet toute sorte d'apprentissage, une autre question se pose : *comment apprenons-nous les gestes moteurs ?* On va chercher à répondre à cette question à l'aide des deux principales théories cognitives sur le contrôle moteur, illustrées brièvement dans les prochains paragraphes. En général, les théories du contrôle moteur tiennent compte de quatre variables : les étapes d'apprentissage, le type de tâche à réaliser, la pratique et le feedback.¹² On va les expliquer brièvement ici de suite.

Selon Fitts et Posner (1967), il y a trois *étapes ou phases d'apprentissage*. La première est celle « cognitive » où l'individu connaît chaque séquence du mouvement à réaliser mais il ne sait pas encore comment l'exécuter. Il y a par la suite l'étape dite « associative » où à travers la répétition motrice les erreurs diminuent et l'exécution se raffine peu à peu (la performance devient moins variable). Et pour finir, il y a la phase « automatique » où comme le dit le mot, le geste moteur devient automatique et nécessite un moindre effort cognitif pour être exécutée (habileté motrice apprise et maîtrisée). Les *figures 4, 5, 6 et 7*¹³ présentent un résumé de chaque phase avec ses caractéristiques et un graphique avec le niveau attentionnel nécessaire dans chaque phase (et quelle partie du cerveau est plus utilisée).

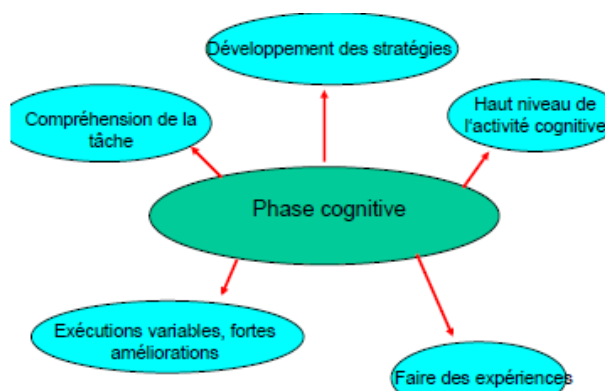


Figure 4. Phase cognitive de la théorie des trois phases de l'apprentissage (Fitts & Posner, 1967).

¹² https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_moteur (12.04.2017)

¹³ Figures tirées d'un cours de Sciences du mouvement, prof. Taube, 2016, université Fribourg.

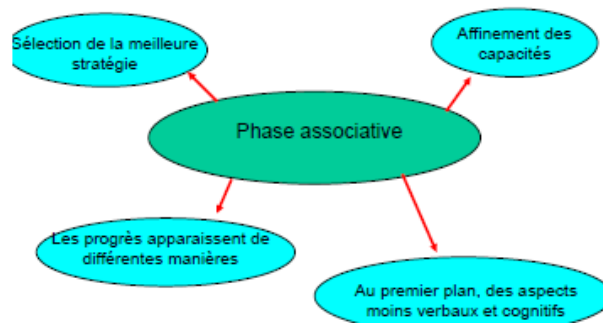


Figure 5. Phase associative de la théorie des trois phases de l'apprentissage (Fitts & Posner, 1967).



Figure 6. Phase automatique de la théorie des trois phases de l'apprentissage (Fitts & Posner, 1967).

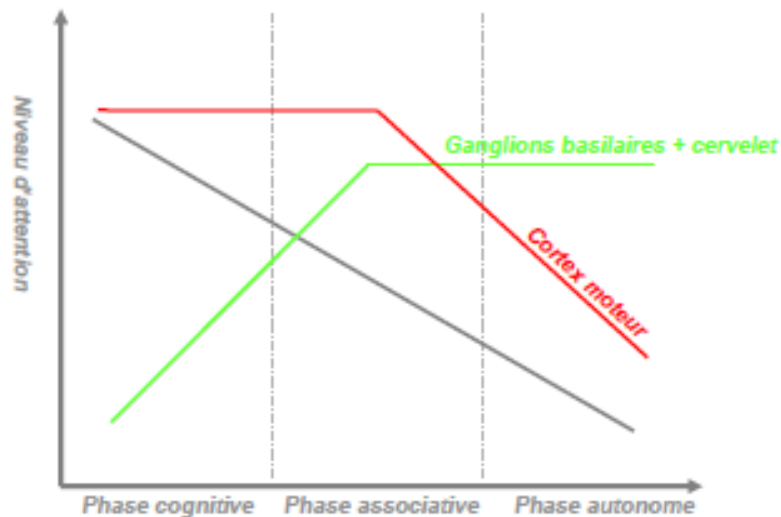


Figure 7. Graphique du niveau attentionnel et des parties du cerveau utilisées en fonction des trois phases (Fitts & Posner, 1967).

Les types de tâche possibles sont deux : « ouverte » ou « fermée ». Nous classifions comme ouverte une tâche qui se déroule dans un environnement instable où les actes moteurs sont

imprévisibles (par exemple le foot). Au contraire, une tâche est dite fermée quand l'environnement est stable et les actes prévisibles (par exemple écrire). La troisième variable est *la pratique*. Pour apprendre il faut pratiquer, pratiquer et encore pratiquer. Il y a cependant différentes manières d'apprendre (voir chapitre 2.3 *Méthodes d'apprentissage*).

La quatrième, et pour nous plus intéressante, variable est la rétroaction : *le feedback*. On commence à l'introduire ici, à travers les théories du contrôle moteur, mais on lui dédiera un chapitre plus tard, vu qu'il s'agit du thème portant de notre investigation. Le feedback influence beaucoup l'apprentissage ; si on n'a pas de feedback on n'arrive pas à comprendre nos erreurs et à nous améliorer.

2.2 Théories du contrôle moteur

2.2.1 Théorie de la boucle fermée d'Adams (1971).

Cette théorie se base sur l'idée que l'humain possède « the internal reference of correctness » (Adams, 1971). Adams dit qu'il y a deux traces différentes ; la trace *mnésique* (liée à la mémoire de rappel) qui sert à générer les commandes motrices et la trace *perceptuelle* (liée au processus de reconnaissance) qui sert de référence et permet de corriger la réponse par comparaison des *feedbacks* reçus en cours d'exécution. On a donc une boucle fermée, ou la rétroaction est le point clé pour l'apprentissage. La *figure 8* (Simonet ; 1986) nous donne un résumé graphique de cette théorie¹⁴. On pourrait dire que selon Adams, nous apprenons la référence.

¹⁴ http://eaiao.envsn.fr/Perf_sportive/niveaux_controle/texte/organisation_motricite/schema_general.htm
(13.04.2017)

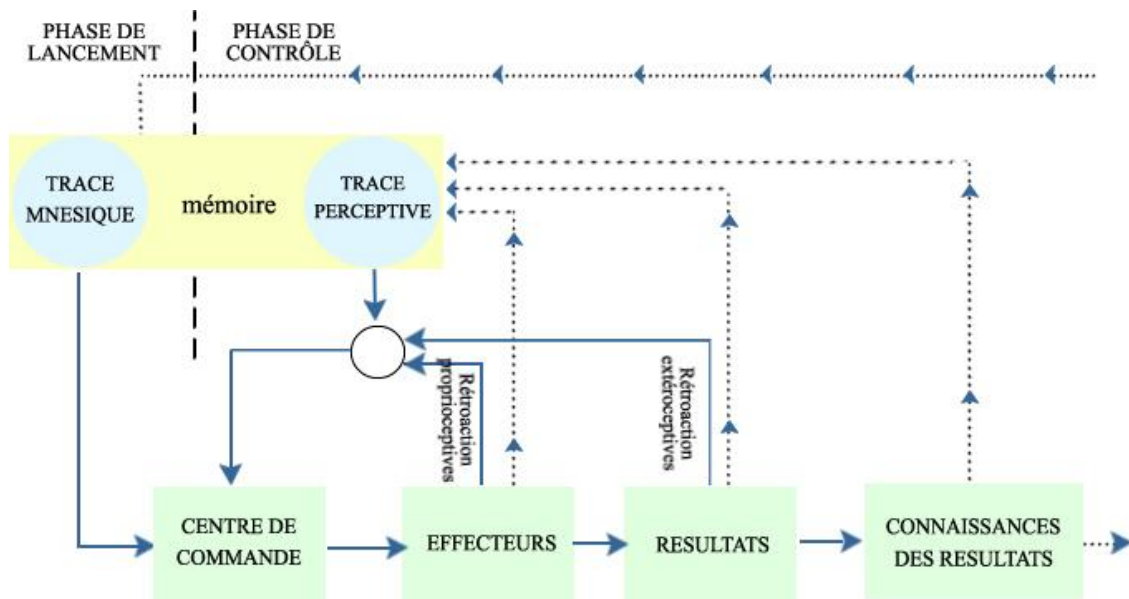


Figure 8. Schéma récapitulatif de la théorie de la boucle fermée (Adams, 1971).

2.2.2 Théorie du schéma de Schmidt (1975).

Cette théorie se base sur la notion de programme moteur généralisé (PMG). Schmidt regroupe les mouvements similaires sous le même PMG en fonction des invariants et des paramètres à définir. Un PMG définit une même classe de mouvement avec des informations sur la séquence des contractions musculaires, le temps relatif pour produire l'action ainsi que la force relative nécessaire. Un PMG peut être cependant affiné, en variant le groupe musculaire impliqué, la durée absolue et la force absolue des impulsions motrices. Ces ajustements correspondent aux *schémas de réaction moteurs* (des règles qui lient les paramètres aux variations environnementales). Schmidt fait la distinction entre *schémas de rappel* (qui s'occupent des mouvements ouverts) et *schémas de reconnaissance* (pour les mouvements fermés). Pour l'auteur, nous sommes toujours face à un problème qu'il faut résoudre en transférant nos connaissances issues de notre expérience. Une version graphique de cette théorie aussi est proposée dans les figures 9 et 10.

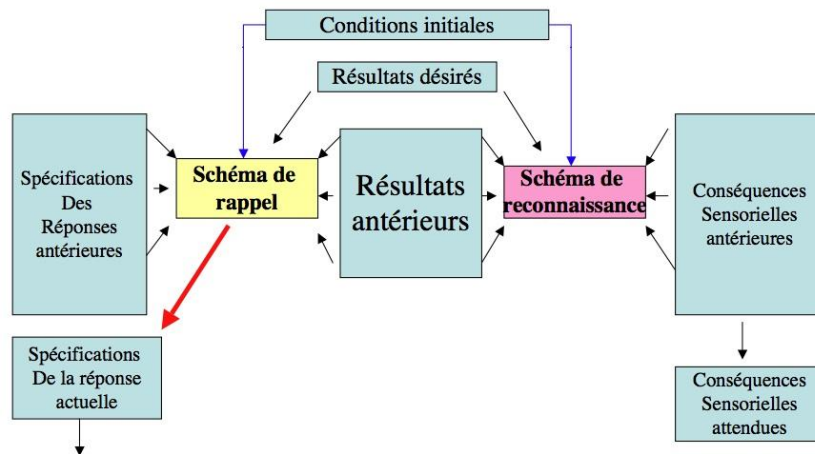


Figure 9. Théorie du schéma (Schmidt, 1975).¹⁵

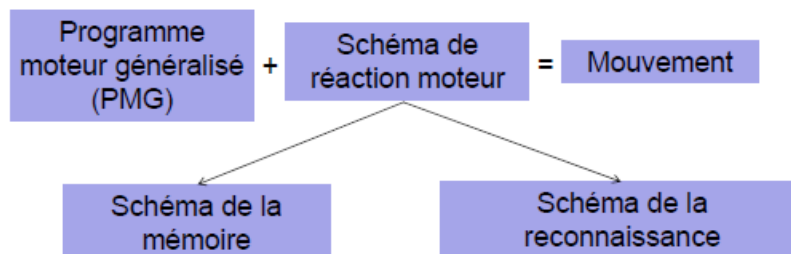


Figure 10. Résumé de la théorie de Schmidt (Schmidt, 1975).¹⁶

En conclusion, nous pourrions dire qu’aucune des théories (les deux présentées ci-dessus, mais aussi les autres existantes : théorie du réflexe, théorie hiérarchique, *motor programming theory*, théorie du système, théorie de l’action dynamique) n’explique complètement comment nous apprenons les mouvements ; chacune a ses limites et ses points forts. Chacune est applicable plus ou moins bien à des situations différentes. La seule solution pour se rapprocher d’une réponse à notre question initiale *comment apprenons-nous ?* est de connaître les principes fondamentaux de chaque théorie et unir les points forts de l’une ou l’autre théorie.

Dans notre expérience pratique, nous avons choisi un apprentissage moteur spécifique à un sport : la rondade, élément gymnique au sol. La difficulté de cette gestuelle n’est pas indifférente, vu qu’elle se compose de plusieurs actes moteurs. Elle nécessite donc un bon contrôle moteur et des capacités de coordination développées. Selon les concepts que nous avons illustrés dans ce chapitre, la rondade est une tâche fermée (environnement stable et actes moteurs

¹⁵ http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/edu_mot3/ahm2.pdf (13.04.2017)

¹⁶ Tiré du cours de Sciences du mouvement, Prof. Taube, 2016, Université de Fribourg.

prévisibles) qui appartient à un certain PMG affiné par différents schémas de réaction moteurs. On parlera plus dans le détail du mouvement rondade plus loin dans ce travail, avec un chapitre qui y est totalement dédié.

2.3 Méthodes d'apprentissage

2.3.1 Apprentissage par imitation.

Il y a imitation quand un apprenant observe un modèle exécutant une action, et simultanément il le copie dans l'exécution. Le processus impliqué dans l'imitation est le même que nous utilisons dans la reconnaissance. Il nous permet en quelque sorte de comprendre le mouvement. L'imitation est la source d'apprentissage « instinctive » par excellence. Les enfants apprennent spontanément par imitation : paroles, gestes, mimiques. Il a été démontré qu'aussi les animaux sont capables d'apprendre par imitation d'un modèle. Une expérience a été effectuée avec des bébés macaques, qui devaient imiter un humain dans le geste de tirer la langue. Ils l'imitaient tout à fait.¹⁷

L'imitation est une méthode très efficace, parce qu'elle permet *l'identification* (comme se voir en miroir), *la communication* (selon Bandura¹⁸ l'enfant peut jouer et échanger avec les autres par ce biais), *la compréhension* (des intentions des autres ; développement de l'empathie).

Les mécanismes neuronaux sous-tendant l'imitation reposent notamment sur l'existence de « neurones miroir ». Ce type particulier de neurone a été découvert par Rizzolatti et son équipe au début des années 1990. Ces neurones s'activent lors de l'exécution d'une action, mais aussi lors de l'observation de l'exécution de cette action et lors de l'imagination d'exécution. D'où le nom « miroir ».¹⁹

Dans notre expérience nous n'utilisons pas cette méthode, mais nous aurions pu créer une condition où le sujet avait comme feedback l'exécution réelle d'une rondade par l'expert. Dans ce cas, il y aurait eu un apprentissage par imitation.

¹⁷ Cours de psychologie sociale, Prof. Wagner, 2012, Université de Fribourg.

¹⁸ Psychologue canadien, connu par sa théorie de l'apprentissage social.

¹⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone_miroir (13.04.2017)

2.3.2 Apprentissage par observation.

Sheffield (1961) dans sa théorie de la représentation symbolique soutient que la démonstration préalable à la pratique engendre déjà une séquence de réponses perceptives et symboliques (interprétation en fonction de l'expérience passée) sur le mouvement. Sheffield dit donc, contrairement aux théories du contrôle moteur qu'on peut parler d'apprentissage moteur même avant d'avoir exécuté le geste, tandis que pour Adams et Schmidt, comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, il faut avoir une expérience physique suivie d'un feedback pour parler d'apprentissage moteur. Blandin (2002) a démontré que la pratique physique couplée à l'observation d'un modèle conduisait à de meilleurs résultats que la simple pratique physique.

Notre expérience utilise la méthode d'*apprentissage par observation* (de la vidéo et pas du modèle directement) couplé à la pratique, exactement comme chez Blandin. Chez nous, l'observation est la variable testée : l'observation *d'un modèle* (vidéo normale ou 3d, conditions 1 et 2) versus l'observation *de soi-même* (superposé au modèle, conditions 3 et 4). L'apprentissage par observation utilise les neurones miroirs aussi, en étant une imitation en différé. Pour être plus précis, nous pourrions définir apprentissage par observation les conditions 1 et 2, et *apprentissage par comparaison* les conditions 3 et 4. La comparaison requiert un effort cognitif plus important que l'observation mais permet de créer des feedbacks plus immédiats.

2.3.3 Autres méthodes d'apprentissage²⁰.

On passera en revue les autres types d'apprentissage, sans les approfondir, mais juste pour en avoir un aperçu, vu que notre expérience se base principalement sur l'apprentissage par observation/comparaison.

Il y a l'apprentissage par *habitation*, qui a lieu lors d'une exposition prolongé à un stimulus et qui se manifeste avec une diminution graduelle de l'intensité ou de la fréquence d'apparition d'une réponse à ce stimulus (par exemple la gestion des émotions lors d'un mouvement extrêmement difficile ; après l'avoir répété et acquis, on n'a plus d'émotions négatives).

Il y a aussi l'apprentissage par *association*, qui peut être sous forme de conditionnement classique (Pavlov) ou conditionnement opérant (Skinner). Un exemple dans notre cas, pourrait être d'associer à la bonne exécution du mouvement à apprendre, une récompense (une félici-

²⁰ Notions tirées du cours de Psychologie du sport, prof. Thibaut Le Naour, 2016, université de Fribourg.

tation verbale). Il y a enfin l'apprentissage cognitif, avec la notion d'insight : comprendre tout d'un coup le fonctionnement du mouvement de la rondade, dans notre cas.

3. La notion de feedback

3.1 Définition, types et caractéristiques

Schmidt et Debû (1993) définissent le feedback comme l'information concernant la différence entre l'état d'un objectif et la performance. En d'autres mots, il nous informe sur l'écart entre la performance réalisée et la performance visée (objectif, idéal). Sans connaissance soit du résultat soit du déroulement de l'action, l'apprenant se retrouve incapable d'acquérir une habilité. Le feedback représente donc une composante primordiale de l'apprentissage.

Le feedback peut se focaliser sur deux aspects différents ; *le processus* (CP) ou *le résultat* (CR). Par processus on entend le déroulement de l'action, tandis que le résultat comprend toutes sortes de mesures, notes ou objectifs atteints. Rothstein et Arnold (1976) ont démontré que le CR est plus efficace pour l'apprentissage d'habilités ouvertes (p.ex. football). Au contraire, Buekers (1995), Newell et Walter (1981) et Rothstein et Arnold (1976) ont prouvé que le CP est plus bénéfique pour l'apprentissage d'habilités fermées (p.ex. élément gymnique). Dans notre cas, l'apprentissage d'une rondade, il s'avère difficile de distinguer les deux types de feedback vu que le résultat/objectif correspond au mouvement lui-même (le déroulement, la forme). Cette difficulté de distinction a été observée aussi par Guadagnoli, Holcomb et Davis (2002) dans plusieurs situations.

Le feedback (ou retour d'information en français) peut avoir deux différentes origines. Il peut s'agir d'un feedback qui provient de nos afférences sensorielles, auquel cas nous parlerions de feedback *intrinsèque*. Les sources du feedback intrinsèque peuvent être les 5 sens, la proprioception et le système vestibulaire²¹. Au contraire, un feedback *extrinsèque* est constitué d'informations provenant d'un agent externe, que ce soit une tierce personne (commentaires ou signes) ou un artifice (mesure ou trace). Le feedback extrinsèque se présente normalement sous forme verbale mais peut aussi être présenté sous forme visuelle telle que : photo, séquence vidéo, graphique, etc. comme dans notre expérience. Avec les deux feedback (intrin-

²¹ Notions prises d'un cours de Psychologie du sport, prof. Dubois, 2016, Université de Fribourg.

sèque et extrinsèque), nous avons le retour d'information plus complet possible qui est appelé *feedback augmenté*.²²

Un autre paramètre à définir, après le type et l'origine, est la fréquence. Pour le feedback intrinsèque, il s'avère impossible de le définir, vu que chaque fois que nous exécutons un mouvement nous en créons un, du moins inconsciemment. Par contre, la fréquence de feedback externe peut se définir par le pourcentage d'essais où un feedback est donné. Nous parlerions de feedback *total* ou *absolu* si un feedback est donné après chaque essai, et de feedback *relatif* s'il est donné uniquement après certaines tentatives. On peut également parler de feedback *moyenné* sur une série de mêmes tentatives. Le feedback est *atténué*, si au fur et à mesure que les tentatives augmentent, les feedbacks diminuent. La fréquence optimale dépend de plusieurs facteurs, dont le niveau d'expertise du sujet, la difficulté de la tâche et le temps de pratique. Selon Guadagnoli, Dornier et Tandy (1996), plus faible est le temps de pratique, plus important est le besoin de feedback (inversement proportionnel).

Dans notre expérience, nous avons opté pour un feedback *moyenné* (sur une série de trois répétition, un seul feedback était donné), lequel, vu le petit nombre de répétitions, pourrait aussi être considéré comme *quasi-total*. Ce choix a été fait car la majeure partie des sujets connaissait peu le mouvement et avait donc besoin d'un feedback assez fréquent. On a évité un feedback total, car ça prenait trop de temps et ça aurait pu nuire à l'apprentissage comme le montrent les études de Wulf, Lee et Schmidt (1994) et Salmoni *et al.* (1984). Ces auteurs ont démontré que trop de feedbacks externes peuvent détourner le sujet des informations intrinsèques et donc agir négativement sur l'apprentissage. Pour éviter cette situation, la solution serait donc, comme le décrivent Mérian et Baumberger (2007), un mélange de feedback presque total en début d'apprentissage suivi d'une diminution progressive.

Un autre point important à définir est le délai dans lequel un feedback est donné (par rapport à l'exécution du mouvement). On parle de feedback *simultané* quand action et feedback sont concomitants. Selon Swinnen, Lee, Verschueren, Serrien et Bogaerds (1997), le feedback simultané est bénéfique pour améliorer la coordination segmentaire du corps. Le feedback est dit *décalé* s'il est donné après un court laps de temps, et *différé* s'il est donné après un peu plus de temps. Selon Austermann, Hula, Robin, Ballard et Schmidt (2008) et Ranganathan et

²² <https://www.cairn.info/revue-staps-2007-2-page-107.htm> (18.04.2017)

Newell (2009), le feedback délayé semble être la solution idéale car il laisse assez de temps à l'apprenant pour intégrer les informations intrinsèques. Pour cette raison, dans notre expérience nous avons choisi un feedback délayé.

3.2 Feedback vidéo

On arrive au vif du sujet de notre travail avec un feedback extrinsèque particulièrement puissant : la vidéo. Ça permet de capturer la performance et de l'analyser par la suite. L'idée pédagogique que nous voyons dans l'utilisation des vidéos pendant les cours d'éducation physique est la possibilité de donner accès à l'élève aux détails, tant CP que CR, qui lui échappent sur le moment de l'action. Ça peut lui permettre de se connaître mieux (processus identitaire) et de remodeler sa représentation mentale (souvent trompeuse) afin de créer une nouvelle situation de référence pour le prochain essai (Schmidt, 1993 ; Bandura, 1976). La technologie moderne nous offre en plus quelques outils intéressants, reconnus comme *facilitateurs d'apprentissage* (Mohnsen, 2001). Pour le visionnage par exemple, nous pouvons choisir de mettre l'accent sur deux aspects : l'aspect temporel (vitesse de visionnage) ou sur l'aspect spatial (focus attentionnel ciblé versus général, analyse des angles, cinématique...).

3.3 Feedback vidéo virtuel interactif

Cette nouvelle forme de feedback semble avoir encore plus de potentiel de la vidéo normale. Pour cette raison, nous avons choisi de nous concentrer dessus. Qui n'a jamais rêvé de se comparer à son idole? Que ce soit Roger Federer, Cristiano Ronaldo ou Simone Biles, pour rester dans la gymnastique. Avec le FVVI c'est maintenant possible ! Le FVVI peut être défini de cette manière : *retour d'informations vidéo d'une performance réelle d'un sujet sous forme d'un Avatar digital en 3d*. Les principaux bénéfices de ce nouvel outil sont le fait de pouvoir superposer le mouvement d'un expert à sa propre gestuelle et d'avoir ainsi une comparaison directe avec sa propre performance; le fait de voir deux Avatars identiques et donc pouvoir s'identifier encore plus avec l'expert ; le fait de pouvoir choisir l'angle de vision et donc pouvoir exploiter des points de vue inhabituels qui pourront donner des informations intéressantes. Voilà le potentiel du FVVI !

Le FVVI est consultable en *simultané*, dit aussi *online* ou alors à n'importe quel moment en *différé* ou *délayé*, dit pour l'occasion *offline*. La perspective de se voir online avec un modèle

offre à l'apprenti une précision plus accrue de l'espace d'évolution. En revanche, avec ce mode de visionnage, l'apprenti peut se retrouver dans une position compliquée pour voir l'écran ou il risque d'allouer trop d'attention au feedback (et pas assez à l'exécution). Pour éviter ces problèmes, la consultation offline permet une disposition et un calme que nous n'avons pas durant l'exécution du mouvement. De plus, avec ce deuxième mode de visionnage, il est possible de varier la perspective à l'aide d'artifices informatiques (ralenti, arrêt sur image, zoom, etc.). Vu le type de mouvement choisi (le feedback online résulte physiquement impossible) et les considérations effectuées ici dessus, nous avons choisi d'utiliser le mode offline pour notre expérience.

Pour profiter au maximum du FVVI, il faut que quelques pré-requis soient présentes :

1. La tâche doit être de nature fermée.
2. La maturité cognitive et motrice de l'apprenti doit être suffisante. La proprioception doit être bien développée pour pouvoir se corriger (Salmoni *et al.*, 1984; Magill, 1993).
3. La motivation de l'apprenti. Nous pensons surtout aux élèves qui doivent apprendre à concevoir la vidéo comme un outil et non comme une occasion de se mettre en scène. Selon Fonseca, Guinand, Baumberger et Lentillon-Kaestner (2012), les élèves doivent dépasser le stade de « passer à l'écran » pour « apprendre par l'écran ».

Pour remplir ces pré-requis, selon Rüdisühli (2002), il faut penser à un *préapprentissage* d'accoutumance à la vidéo (en majeure raison pour le FVVI!) pour que les élèves apprennent à utiliser le feedback de manière efficace. L'élève doit passer par une phase d'appropriation de son image afin de se focaliser uniquement sur les détails pertinents à la progression de la performance.

Malgré tous ces bienfaits, qui pourraient nous montrer le FVVI comme une vraie révolution pédagogique, il y a quelques limites à observer (qui touchent surtout l'enseignant):

1. L'aspect logistique : où, quand, comment déplacer les élèves au laboratoire.
2. Le coût financier du matériel pour la capture.
3. L'aspect disciplinaire : protection du matériel, élèves qui se croient des acteurs, possible amotivation ou gêne de passer en vidéo.
4. Le temps : le FVVI prend beaucoup de temps.

Les limites concernent surtout le professeur, les élèves n'en tirant que des avantages. C'est donc au professeur de voir s'il est faisable d'intégrer quelques fois cet instrument innovateur comme *plus-value* à ses cours. Pour les clubs sportifs, il est sûrement plus facile organiser le tout, le seul point négatif reste le coût.

3.4 Etat des travaux préliminaires

Plusieurs études ont déjà été faites dans le domaine du feedback vidéo, et aussi sur le feedback en réalité virtuelle 3d, le FVVI. Nous allons en présenter quelques-uns qui nous fournissent des informations intéressantes.

L'étude de Roosink *et al.* (2015) avait comme but de savoir s'il est possible de s'identifier clairement à son Avatar créé en réalité virtuelle. Les participants étaient assis devant un écran où ils voyaient leur Avatar. Des différents angles d'inclinaisons étaient atteints par le sujet et l'Avatar faisait de même à l'écran. L'objectif était de dire si l'Avatar s'inclinait plus ou moins que leur mouvement (les expérimentateurs manipulaient l'inclinaison de l'Avatar, parfois en créant un biais). L'expérience a prouvé que nous avons une forte capacité à comprendre si l'Avatar correspond à nos mouvements ou pas. Ce résultat confirme que nous pouvons nous servir pleinement de l'Avatar pour la comparaison avec nous-mêmes ; il s'agit d'un feedback de qualité.

La réalité virtuelle peut être aussi utilisée dans la réhabilitation. L'étude de Giraud et Sirigu (2003) porte sur la rééducation dans des cas de douleurs fantômes (membres amputés ou pas). Ils ont obtenu des résultats encourageants en huit semaines au cours desquelles les patients devaient imaginer des mouvements avec la main fantôme et les faire correspondre aux mouvements préenregistrés d'une main virtuelle. Le cerveau va progressivement se réorganiser ce qui réduit la douleur. En d'autres termes: les représentations internes de la personne sont modifiées en stimulant les zones corticales qui concernent le membre fantôme, pour enfin restaurer une image corporelle intacte. La réalité virtuelle non seulement permet la modélisation du membre fantôme mais aussi du corps entier. Le fait de pouvoir s'identifier fortement à l'Avatar (créé avec des caractéristiques physiques propres au sujet) favorise l'apprentissage du patient. Son cerveau est encore plus impliqué dans la rééducation (car il s'identifie vraiment totalement), ce qui permet une réduction importante des douleurs neuropathiques et musculo-squelettiques.

Une autre étude de Chua *et al.* (2003) sur le FVVI, très semblable à notre expérience, portant sur le tai-chi a donné des résultats surprenants : aucun résultat significatif ; aucune condition ne s'est avérée être meilleure qu'une autre. Les conditions étaient : *One on One* (un élève, un maître), *Four Teachers* (quatre maîtres entourant un élève), *Side By Side* (4 maîtres et élèves dans diverses orientations entourant un seul élève), *Superposition 1* (5 élèves avec un fantôme rouge du professeur superposé sur eux-mêmes), *Superposition 2* (5 élèves fantômes en verts superposés avec des bâtonnets rouges symbolisant le maître). Ils supposaient que les conditions *Expert modeling* (*Superposition 1 et 2*) devraient donner des meilleurs résultats, mais cela n'a pas été le cas. Probablement car le sujet devait effectuer le mouvement simultanément à la visualisation du feedback, et il a eu un surcharge d'informations. Cette idée est soutenue par Schmidt et Wulf (1997) et Pomplun et Mataric (2000).

Une autre recherche intéressante est celle d'Anderson, Grossman, Matejka et Fitzmaurice (2013). Ils ont utilisé un logiciel qui s'appelle *YouMove*, qui fonctionne comme un jeu vidéo interactif. Le sujet se voit en mode miroir et possède plusieurs choix pour entraîner son mouvement. Deux de ces modes travaillant en simultané vont nous intéresser tout particulièrement puisqu'ils concernent le FVVI. Il s'agit du mode *posture guide* et *mouvement guide* qui utilisent une sorte d'Expert virtuel. Le sujet peut aussi retravailler sa performance grâce à un post feedback également composé de différents modes dont celui de la superposition. L'expérience consistait en deux conditions : vidéo normale et *YouMove*. Entre pré- et post-test les résultats sont flagrants : *YouMove* permet un apprentissage double par rapport à la vidéo normale. En plus, l'apprentissage est continu et ne donne pas l'effet plateau après stabilisation du mouvement, ce qui est le cas pour la vidéo normale. La rétention est aussi meilleure. Le seul doute est quel mode permet l'obtention de ces résultats, vu que les sujets étaient libres de travailler avec le mode qu'ils préféraient. En regardant la fréquence d'utilisation de chaque mode (ils ont recueilli aussi ces données dans un graphique), on peut voir que le mode superposition (*Expert modeling + sujet*) était le plus utilisé, que ce soit en simultané ou en post-feedback.

Une autre étude très proche à la nôtre a été conduite par Arbabi et Sarabandi (2016). Elle porte sur l'acquisition et la rétention du service long au badminton. Trois différents types de modèle sous forme vidéo étaient présentés aux sujet : *self-modeling*, *expert-modeling*, *combined modeling* (qui correspond à notre superposition *expert modeling + sujet*). Chaque type de modèle donnait lieu à deux conditions expérimentales : avec ou sans feedback (de

l'entraîneur, en addition à la vidéo-modèle). Le but était au final de comparer les six conditions, et de voir laquelle avait l'effet le plus bénéfique sur l'apprentissage.

Les résultats montrent que le *combined modeling* + feedback a eu les scores plus hauts. Le deuxième meilleur est le *self-modeling* + feedback. Les groupes *expert-modeling* avec et sans feedback ont eu des résultats similaires, tandis que le *self-modeling* sans feedback a donné les pires scores. Il faut préciser que toutes les conditions ont quand même eu une amélioration dans les phases de performance et de rétention. Une partie des résultats peut être expliquée avec la théorie de l'apprentissage social de Bandura : la capacité attentionnelle d'un individu est la base de l'apprentissage par observation. Avec un feedback, l'attention est mieux canalisée sur la performance. Donc avec feedback c'est mieux que sans. Les résultats « moyens » des deux conditions avec *expert-modeling* sont expliqués dans l'étude en disant qu'il n'y a pas d'informations directes sur les erreurs à corriger (vu qu'il n'y a pas de vidéo de soi, mais seulement la représentation interne que chacun se crée avec ses sensations).

Nous reviendrons plus tard dans le travail sur les résultats de cette étude pour les comparer aux nôtres.

On peut déjà faire un premier bilan avec les quelques travaux présentés ci-dessus. Le FVVI est sûrement un outil pédagogique puissant, qui doit être exploité de manière efficace dans chaque situation différente. Surtout le feedback avec l'*expert virtuel* semble être très utile mais il faut continuer à investiguer la problématique du moment où le feedback doit être donné pour obtenir une efficacité maximale. Il faudrait toujours éviter le problème de la surcharge d'informations. Dans notre expérience, nous avons moins rencontré ce problème car les sujets sont tous des étudiants en sport, habitués à traiter beaucoup d'informations liées au mouvement en même temps. Il a fallu quand même qu'ils prêtent beaucoup d'attention à la phase de visualisation du feedback, laquelle influence directement nos résultats.

Comme dernières références, nous avons pensé à vous proposer des études effectuées par des étudiants de l'Haute Ecole Pédagogique (HEP) Vaud. Ces études ont le même but de fond que le mien : comprendre l'utilité du feedback vidéo comme outil pédagogique dans l'enseignement de l'éducation physique. Une recherche de Mérian et Baumberger (2007) a été menée sur deux mouvements complexes (qui pourront être comparés à la rondade pour leur difficulté) : le tour d'appui à la barre fixe et le saut fosbury. Deux conditions ont été comparées : feedback verbal seul et feedback verbal augmenté par un feedback vidéo de la

performance. Pour les deux mouvements, les élèves qui disposaient de l'apport vidéo ont appris plus vite.

La question que certains étudiants de l'HEP de Vaud se sont posés, en partant de l'étude de Mérian et sur proposition de leurs enseignants à effectuer leur travail de mémoire professionnel sur cette thématique, est : *est-ce que la plus-value du feed-back vidéo est transposable à d'autres types de mouvements plus ou moins complexes ?*

Une étude de Cernohorsky et Lindenberger (2008) sur le saut périlleux avant a confirmé que les élèves avec feedback vidéo ont progressé plus vite (sur la performance globale et sur 5 des 6 critères évalués) que ceux qui disposaient seulement du feedback verbal. Quartacci et Strahm (2010) ont effectué une recherche sur l'apprentissage d'un geste nouveau, le lancer du disque. En ce cas, le feedback vidéo n'a pas eu un effet bénéfique tout de suite (séance d'apprentissage) mais plutôt en un deuxième temps dans la séance de rétention. Les élèves qui avaient eu un feedback vidéo ont conservé leur performance, alors que les autres (feedback verbal uniquement) ont régressé. Une investigation plus détaillée sur le mouvement a montré que les écarts de performance entre condition feedback et verbale n'étaient pas les mêmes pour les mouvements des bras (gestes simples) et les mouvements de rotation du corps, jambes et hanches (gestes plus complexes). Les bénéfices du feedback vidéo sont plus grands pour les mouvements complexes que pour les simples.

Une autre question qui a été posée est : *un feedback verbal en plus de celui de la vidéo est-il nécessaire ?* A ce propos, Joye (2008) a proposé une expérience sur l'apprentissage du *fosbury-flop* où il y avait une condition où les élèves étaient seuls devant le feedback vidéo, sans aucune correction verbale du maître. Tandis que l'autre condition avait feedback vidéo + correction verbale. Aucune différence significative n'a été montrée entre les deux conditions expérimentales.

Une autre investigation a été faite sur le rôle de la démonstration. Dans l'étude de Walliser et Chevalley (2012) sur le tir en extension au handball, le « groupe témoins » avait une démonstration du geste et des corrections verbales de la part de l'enseignant. Tandis que l'autre groupe appelé « autonome » visionnait une vidéo comme « démo » et devait s'y référer pour se corriger lui-même et s'améliorer. L'efficacité d'apprentissage de l'enseignement autonome était comparable à l'enseignement traditionnel. Bien que parfois les élèves aient regretté l'absence de l'enseignant. Ils ont donc conclu en considérant l'apport vidéo comme une mé-

thode complémentaire (et non à part entière) à celle traditionnelle, puisqu'elle agit comme possibilité de différenciation de l'enseignement.

Ces mémoires professionnels réalisés à l'HEP Vaud ont au final tous montrés que l'intégration de la vidéo durant les cours d'éducation physique n'apporte que des bénéfices au niveau de l'apprentissage moteur et que cela ne péjore pas les autres tâches de l'enseignant (assurer le bon déroulement de la leçon, encourager les élèves en difficulté, gérer le travail en groupe). Les possibilités technologiques actuelles permettent de diffuser quelques secondes plus tard les vidéos filmées ou de passer en boucle la démonstration d'un mouvement (en ce cas aucune intervention du professeur n'est requise). En plus, l'avènement des tablettes permet de se déplacer très facilement et de filmer n'importe quelle séquence à n'importe quel moment, que ce soit pour évaluer la qualité d'un mouvement ou pour étudier la stratégie de groupe dans un sport collectif.

B. Le mouvement choisi – la rondade

4. Explication, décomposition et analyse du mouvement

La rondade est un élément gymnique au sol qui permet de prendre de la vitesse pour après enchaîner des flic-flacs et/ou un salto. C'est donc un mouvement basique très important à acquérir et à stabiliser pour des gymnastes. Aussi dans le cadre scolaire, la rondade peut être un mouvement intéressant à proposer : il faut beaucoup de coordination. Les élèves qui arrivent à l'exécuter correctement font preuve de capacités motrices développées.

La rondade se compose de trois phases :

1. La phase d'élan, qui consiste en un pas de chute (sans ou avec course préalable).
2. La phase principale, qui consiste en une roue avec $\frac{1}{4}$ de tour de mains et une fermeture des jambes en l'air.
3. La phase finale, qui consiste en l'atterrissage pieds unis et un saut d'extension (possible seulement si assez d'élan a été « emmagasiné »).

Dans la *figure 11*, tirée du manuel des directives de gymnastique aux agrès de l'association cantonale tessinoise de gymnastique (ACTG) en collaboration avec la fédération suisse de gymnastique (FSG), vous pouvez voir une schématisation du mouvement, qui représente seu-

lement les phases principale et finale car l'élân peut se dérouler de manière assez libre. L'élément est noté par les juges seulement depuis la pose du pied.

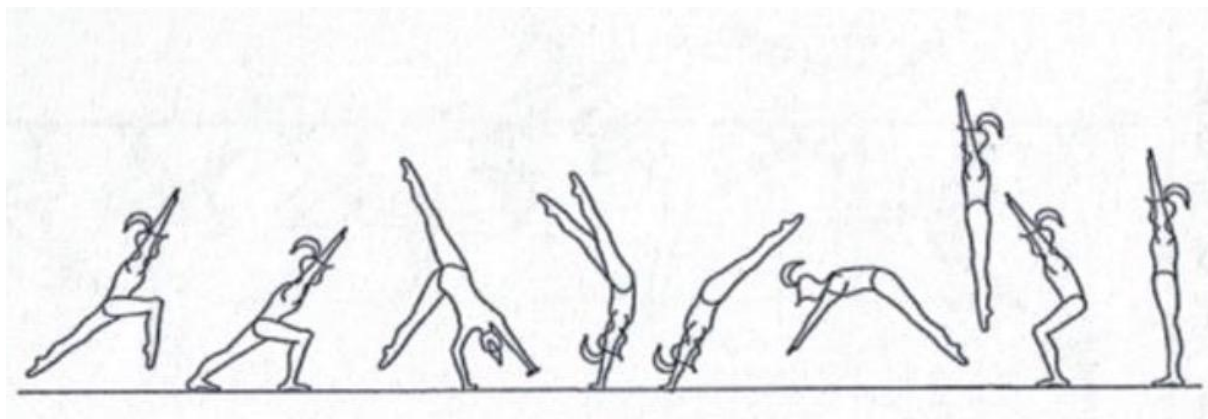


Figure 11. Schématisation de l'exécution d'une rondade.

Nous allons maintenant présenter une rapide analyse du mouvement, afin de comprendre les points plus importants pour une bonne exécution et inversement les erreurs plus fréquentes à éviter.

La phase d'élân doit viser à accélérer le corps en vue de la vraie exécution. Si vous regardez les gymnastes professionnels, vous noterez qu'ils courent très rapidement durant cette phase pour accumuler assez de la vitesse, véhiculée à la rondade en un premier temps, et pour chercher la hauteur maximale dans les acrobaties par la suite. Dans notre cas d'expérience, qui se limite à un cadre scolaire, nous avons imposé aux sujets un élân basique : *le pas de chute*. Il est déjà assez difficile de se coordonner (bras et jambes) pour cet élân. En plus, l'espace disponible en laboratoire ne nous permettait que cette solution. Le pas de chute seul est utilisé comme élân de base aussi dans l'apprentissage de la rondade avec les petits gymnastes et sert de « pas en arrière » lors de la correction d'une erreur grave chez les plus avancés (je parle toujours sur la base de mon expérience de la gymnastique aux agrès).

La phase principale commence avec la pose du pied. La jambe doit être bien pliée (voir signe vert sur l'image) et posée dans l'axe (voir ligne rouge sur les images). Une des erreurs les plus fréquentes survient déjà lors de ce premier temps : jambe presque tendue et désaxée. Cette erreur initiale compromet très fortement la réussite de la suite, car le sujet se retrouve hors axe et sans assez d'élân. Dans les *figures 12 et 13*, nous voyons une pose du pied correctement effectuée.



Figure 12. Pose du pied correcte, vue frontale.

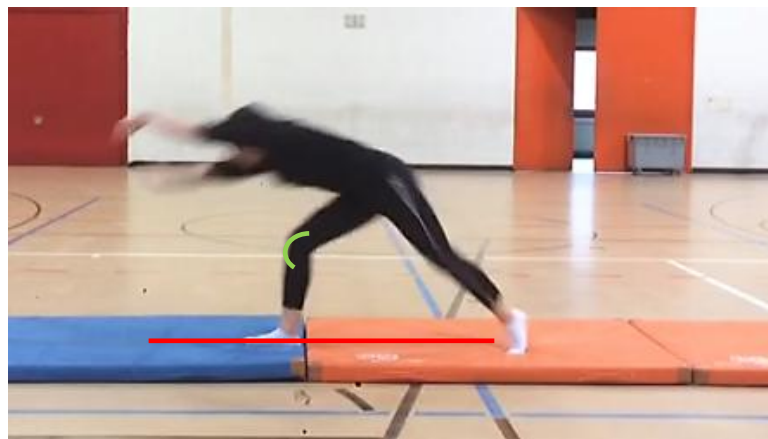


Figure 13. Pose du pied correcte, vue sagittale.

La prochaine étape est la pose des mains. Comme mentionné plus précédemment, il faut les poser avec au moins $\frac{1}{4}$ de tour. Si on exagère un peu dans la rotation des mains, on est avantage en phase de poussée finale car on se retrouve presque complètement tourné et on peut pousser avec les deux bras de la même façon. Sinon, on doit se régler et ajuster avec un bras plus que l'autre. Un autre point important, souvent sous-estimé est le fait de s'allonger le plus possible vers l'avant, avant de poser les mains. Ainsi faisant, nous attaquons le sol avec un petit angle, ce qui nous permet de transformer plus d'énergie et de prendre plus d'élan par la suite. Si au contraire on n'allonge pas (déjà avec le pas, comme vu avant, et avec les bras non plus), on « subit » le sol passivement et on perd notre énergie potentielle sur place. Les figures 14 et 15 nous indiquent comment doit être effectuée la pose des mains. Vous noterez dans la figure 14 que les mains sont posées presque avec un demi-tour.



Figure 14. Pose des mains correcte, vue frontale.



Figure 15. Pose des mains correcte, vue sagittale.

Le mouvement continue avec la fermeture des jambes à la verticale (très difficile, plus faisable un moment après la verticale, mais idéalement à la verticale) et avec la poussée du complexe épaule-bras-mains. Comme nous le voyons dans les *figures 16 et 17*, à ce moment-là, on passe d'une position C^- (à la verticale) à une position C^+ . En gymnastique ce mouvement est appelé *courbette* ; ça permet de prendre beaucoup d'élan si effectué correctement (sans « casser » les angles du bassin et des épaules ou plier les bras).



Figure 16. Phase finale de la courbette, vue frontale.



Figure 17. Phase finale (C+) de la courbette, vue sagittale.

En conclusion de mouvement, il y a un atterrissage partiel (*figure 18*) suivi d'un rebond qui nous amène au saut en extension (*figure 19*) et finalement à l'atterrissage conclusif (amortissement avec les genoux pliés et les bras toujours en haut à côté des oreilles).



Figure 18. Première phase d'atterrissage.



Figure 19. Saut en extension final.

Pour terminer cette partie d'analyse du mouvement, nous allons lister les principales fautes observées durant notre expérience en laboratoire (qui sont les mêmes observées chez les jeunes gymnastes) :

- La pose du pied désaxé.
- La jambe devant pas assez pliée.
- Les mains pas assez tournées.
- Le corps pas assez allongé vers l'avant (tendance à faire le mouvement presque sur place).
- Pas de gainage des abdominaux (banane dans le dos).
- Pas de tenue du corps (jambes pliées, bras pliés, etc.).
- Position de C+ et C- pas correctes, car les angles du bassin et des épaules sont « cassés » (dans la gymnastique, il faut toujours penser à être allongés au maximum).
- Les bras sont le prolongement du corps, ils doivent rester tout au long du mouvement à côté des oreilles. Si on les enlève avant, on perd en poussée et on risque de casser l'angle des épaules.

5. Suite méthodologique : de la roue, à la roue $\frac{1}{4}$ de tour, à la forme finale

Pour apprendre cet élément, on a des formes pré-requises à maîtriser, qui sont utilisées comme exercices préparatoires (et qui font partie du même PMG, pour se référer à la théorie du schéma de Schmidt vue en début de travail). *La roue* (figure 20) est la base ; elle est plus facile car les mains sont posées dans l'axe sagittal, les jambes ne doivent pas se fermer, et on doit atterrir un pied après l'autre. Cette forme est fluide et ne cherche pas la dynamique et la

puissance. Il y a après, dans la suite didactique-pédagogique utilisée par beaucoup de moniteurs de gymnastique, *la roue 1/4 de tour* (figure 21), qui consiste en une roue normale avec 1/4 de tour final de tout le corps (on termine face à l'orientation d'origine). La difficulté de cette forme réside dans le fait de fermer le plus vite possible les jambes au sol, donc de terminer avec les pieds unis. C'est une espèce de courbette mais pas encore avec la poussée où il y a une phase de vol. On cherche la vitesse du mouvement et les positions correctes, en effectuant la fermeture des jambes (mais pas encore à la verticale).

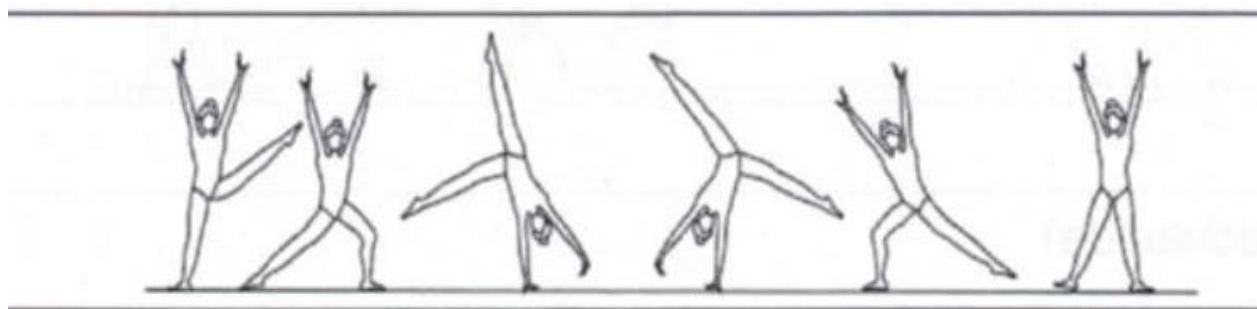


Figure 20. Schématisation de la roue.²³

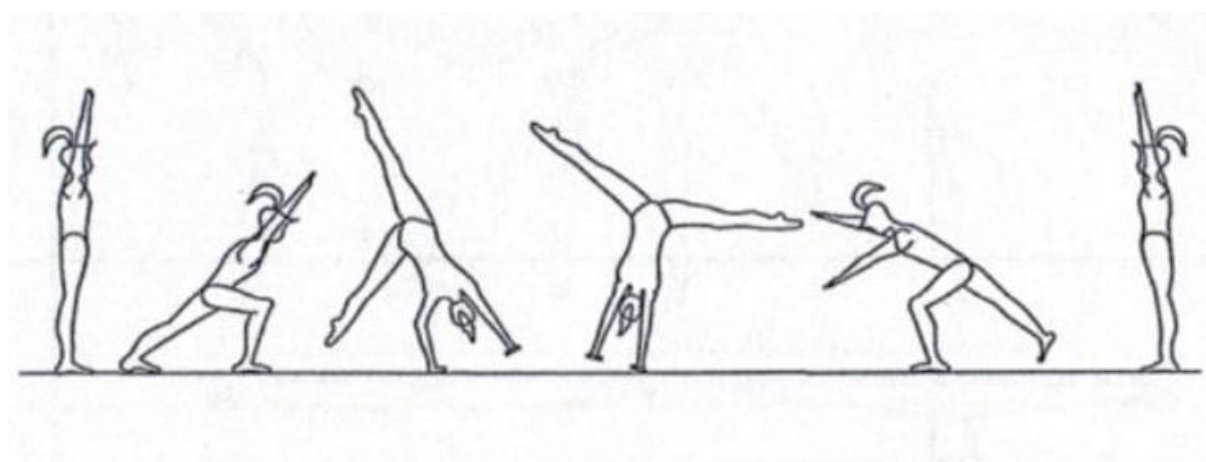


Figure 21. Schématisation de la roue 1/4 de tour.²⁴

Une approche de ce type permet à l'apprenant de se familiariser avec la gestuelle peu à peu, en comprenant les caractéristiques principales de la forme finale et en exploitant les difficultés toujours croissantes de manière fractionnée. Ça permet de corriger peu à peu les erreurs fréquentes et d'arriver à voir l'élément final, non comme un « mur insurmontable » mais comme quelque chose d'atteignable.

²³ Tirée du manuel des directives de la FSG.

²⁴ Tirée du manuel des directives de la FSG.

Notre expérience portait sur la forme finale, car la population de sujets choisie : les étudiants en sport, avait déjà expérimenté la suite méthodologique durant les cours d'agrès obligatoires au Bachelor. Ils avaient selon nous un niveau approprié pour s'exercer directement à la forme finale. Dans certains cas, le retour à une forme plus élémentaire comme la roue ¼ de tour aurait sûrement aidé à améliorer et corriger des erreurs, mais notre expérience portait sur l'utilisation du feedback vidéo en contexte pédagogique et pas sur l'utilisation de différentes formes didactiques. En contexte scolaire, nous pourrions envisager de mélanger le feedback vidéo de la forme finale avec aussi un retour vidéo ponctuel sur les formes préliminaires lors de la détection d'une faute récurrente.

6. Les critères pour une bonne exécution

Les juges de gymnastique aux agrès doivent évaluer chaque élément gymnique sur deux critères : la *tenue* du corps et la *technique*. Pour chaque élément, les déductions possibles sont : jusqu'à 0.3 point pour la tenue, jusqu'à 0.5 pour la technique et 0.4 pour une chute.

Les critères pour une bonne tenue sont :

- Pointes tendues.
- Jambes et bras tendus.
- Jambes fermées (à la fin).
- Gainage général du corps (abdos, fessiers, etc.)

Les critères pour une bonne exécution sont reportés dans la *figure 22*, tirée toujours du manuel des directives de la FSG.

Elemento
Criteri d'esecuzione
<p>Rondata e salto in estensione. Movimento dinamico. Durante l'app. delle mani deve essere effettuato min. 1/4 di giro. Le gambe sono chiuse prima della verticale. Il movimento di courbette porta al salto in estensione in pos. I. Le braccia sono avanti, in alto.</p>

Figure 22. Critères techniques pour l'exécution correcte de la rondade. Traduction:

- *Mouvement dynamique.*
- *Durant la pose des mains doit être effectué $\frac{1}{4}$ de tour au minimum.*
- *Les jambes sont fermées avant la verticale.*
- *Le mouvement de courbette porte au saut en extension en position I.*
- *Les bras sont en avant, en haut.*

IV. Partie pratique-expérimentale

7. But et hypothèse de recherche

Comme mentionné plus haut, la motivation pour conduire une étude sur le feedback vidéo dans l'apprentissage moteur est née de notre conviction du grand potentiel didactique-pédagogique de la source vidéo. Vu la possibilité de travailler dans un laboratoire complètement équipé pour la reconstruction 3d à l'université de Fribourg, nous avons opté pour cette option. Le choix de la gestuelle est motivé dans le chapitre *B. Le mouvement choisi – la rondade*, s'est porté sur un élément gymnique vu ma passion et mon intérêt pour la gymnastique et vu l'assez grande difficulté d'apprentissage de ce mouvement (également pour les étudiants en sport).

Le but de ma recherche est de voir lequel de ces trois types de feedback : vidéo normale d'un « expert » de la gestuelle, FVVI de l'expert (*expert virtuel*), FVVI (sujet) + *expert virtuel* (superposition du mouvement idéal à celui du sujet testé) est le plus bénéfique dans l'apprentissage ou l'amélioration de la rondade. Pour ces trois conditions de feedback, la vidéo sera présentée en vue sagittale et frontale. Une quatrième condition consistera à présenter le FVVI (sujet) + *expert virtuel* mais avec la possibilité d'exploiter librement tous les angles de vue.

Mon hypothèse est que le FVVI + *expert virtuel* permet une amélioration majeure (celui avec tous les angles de vue encore plus que seulement avec les deux plans). Le deuxième meilleur sera la vidéo normale et le dernier la vidéo 3d (FVVI simple). Nous avons formulé cette hypothèse en nous basant sur 2 critères : la familiarité avec le type de feedback et la source d'information. Le FVVI avec *expert virtuel* est une source d'information complexe (on peut se voir dans les 3 dimensions, et ainsi avoir accès à différentes angulations) mais permet d'avoir une référence qu'on appelle comparateur (l'*expert virtuel*) pour mieux comprendre

les spécificités de la gestuelle. Après, contrairement à une certaine logique, nous avons choisi la vidéo normale, car c'est une source d'informations qui nous est familière, i.e., on est habitué à la déchiffrer et elle est relativement facile à interpréter. Tandis que la vidéo 3D est une source complexe qui sans superposition du mouvement idéal pourrait causer une surcharge d'informations ou une mauvaise prise d'information (on ne se focalise pas sur l'essentiel). De plus, le grand public est moins familier avec ce type de feedback (en dehors de ceux qui jouent aux jeux vidéo) car cela nécessite des appareils coûteux (comme ceux utilisés en laboratoire) ou au moins spécifiques (par exemple un *Kinect* pour l'Xbox).

8. Méthode et plan d'expérience

Ce travail de recherche s'articulait en deux phases : la création des groupes et la phase de test. Cette dernière a été subdivisée en pré-test (1 block), phase d'apprentissage-feedback (9 blocks) et post-test (1 block). Chaque block était composé de 3 rondades à effectuer.

Afin de créer les quatre groupes/conditions de manière assez homogène, pour minimiser la possibilité de fausser les résultats avec des différences dues à la constitution du groupe, nous avons donné une évaluation générale aux participants sur le niveau d'expertise gymnique. En tant que gymnaste, professeur de sport, et en ayant une formation J+S en gymnastique aux agrès, je me suis occupé personnellement de cette classification en : débutant, moyen, avancé.

La phase de test était variable selon la condition expérimentale à laquelle les sujets étaient assignés. 32 participants ont été répartis sur les quatre conditions: vidéo normale de l'expert, vidéo 3d de l'expert, vidéo 3d sujet + *expert virtuel* et vidéo 3d sujet + *expert virtuel* avec vue depuis tous les angles (8 participants par condition/modalité, 4 modalités d'une même variable indépendante). L'avatar de l'expert était rouge; l'avatar du sujet était bleu. La *figure 23* résume graphiquement en quoi consistait chaque condition. Dans la phase de visualisation, les sujets étaient libres de jouer la vidéo comme ils voulaient (arrêt d'image, slow motion, normale, rapide) mais dans les conditions 1,2 et 3, ils avaient la contrainte de visualisation dans les deux plans prédéfinis, tandis que la 4^{ème} condition (appelée « active » dans l'image) permettait de jouer aussi sur cet aspect. Les plans prédéfinis étaient le plan sagittal, car il est utilisé par les entraîneurs de gymnastique et surtout par les juges (le seul point de vue possible pour eux), et le plan frontal, car il est utilisé pour détecter des erreurs spécifiques (pose des mains et des pieds) par les entraîneurs vu que l'élément rondade comprend des rotations autour de deux axes différents : l'axe sagittal (mouvement de roue) et l'axe longitudinal (le 1/4 de tour final). En *figure 24*, un rappel graphique des plans et des axes anatomique du corps.

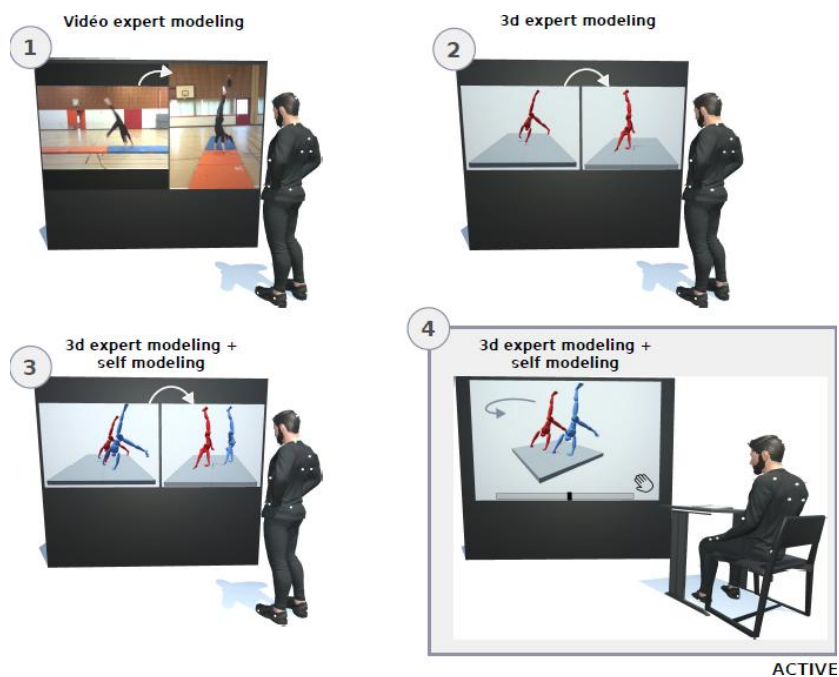


Figure 23. Les quatre conditions expérimentales.

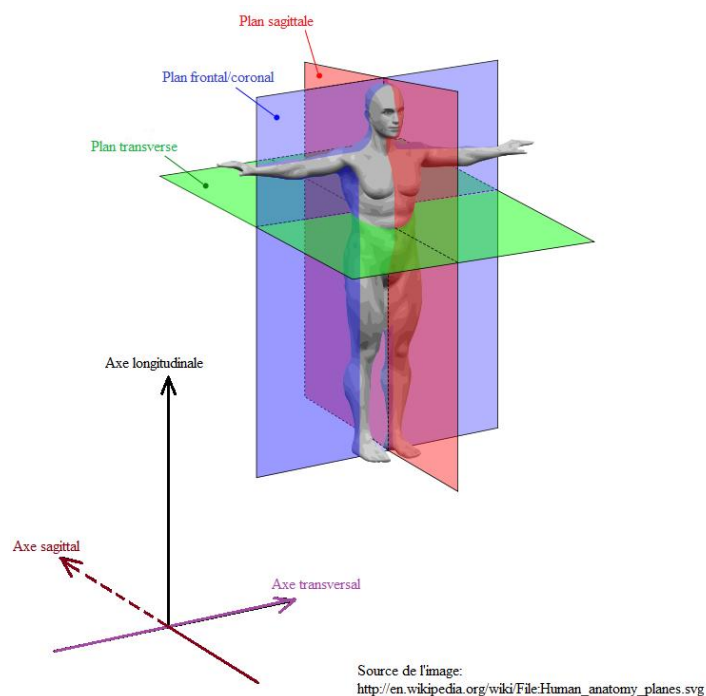


Figure 24. Plans et axes anatomiques du corps.

Tous les participants sont des étudiants en sport, en raison de leurs capacités motrices de base. La rondade requiert en effet un minimum de coordination et d'agilité physique, aptitudes déjà acquises par les étudiants en sport (qui ont vu/verront l'élément rondade pendant le cours d'après II à l'uni). Toutes les conditions ont été testées dans un laboratoire de l'université de Fribourg. Ce qui changeait pendant le test, c'était le type de feedback visualisé par le sujet. Le

protocole était le même pour tous : 11 block de 3 rondades, après chaque block un feedback était montré. Les deux premières rondades (1-2) ont servi de pré-test et les deux dernières (32-33) de post test. La comparaison entre pré- et post-test nous informe sur l'amélioration, la stagnation ou la dégression pour chaque condition. Il est important de spécifier qu'avant de commencer le pré-test, les sujets disposaient de 2/3 essais de familiarisation, pour ressentir les sensations que le mouvement provoquait et se régler en ce qui concerne l'espace d'évolution et l'éventuelle gêne des combinaisons (surtout pour les sensations à niveau des gants, des chaussures et du maillot qui ne devait pas sortir des pantalons).

Pour exploiter la réalité virtuelle 3d, il a fallu équiper les sujets avec des combinaisons proches du corps noires où des marqueurs ont été placés (sur les articulations et sur autres points importants) ; les sujets ont ensuite dû exécuter la rondade dans un espace donné, qui était filmé par des caméras infrarouges. La reconstruction 3d, comme on peut le voir sur la *figure 25*, se faisait en plusieurs étapes avec le logiciel *Motive* et grâce à la détection des marqueurs par les caméras disposées dans la salle. En ce qui concerne l'*expert virtuel* (mouvement de référence), nous avons utilisé le même processus de capture pour ensuite le rejouer en « superposé » aux mouvements des sujets. Vu que j'ai 16 ans d'expérience dans la gymnastique aux agrès, je suis le modèle de l'*expert virtuel*. Mes captures de mouvement ont été prises en premier, et ont servi de « probe » pour se familiariser avec les appareils de ma part, grâce à l'aide de Thibaut Le Naour, et à s'assurer que tout le matériel fonctionnait bien.

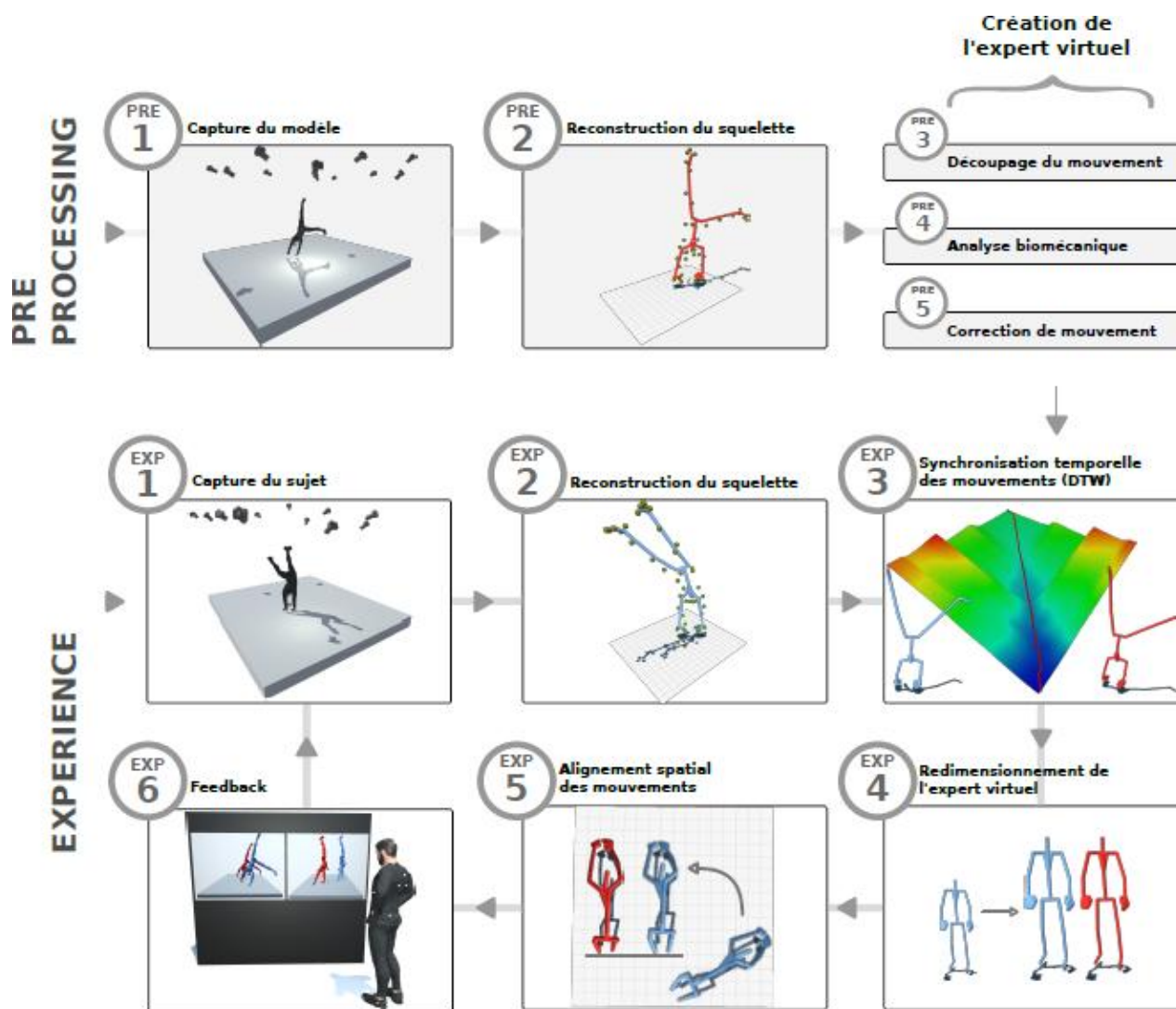


Figure 25. Résumé des étapes de la reconstruction 3d.

Les moments de feedback étaient autonomes ; chaque participant devait visualiser pendant une minute un seul enregistrement (le meilleur des 3 du block, toujours choisi par moi vu mon expérience en gymnastique), l'analyser, chercher à comprendre ses erreurs, et en quoi s'améliorer. Les points plus fréquemment visualisés et analysés (bloc après bloc) ont été la tenue du corps, les hanches et le pas de chute. Certains sujets ont regardé des points particuliers, intéressants à noter : zoom sur la pose des mains et des pieds, la longueur du mouvement (pour voir s'ils avaient allongé plus).

Un autre paramètre important à définir était la méthode d'évaluation des progrès entre pré- et post-test (la variable dépendante). Contrairement à l'évaluation initiale, nous avons décidé de faire appel à deux juges fédéraux de gymnastique aux agrès, qui pouvaient vraiment quantifier l'amélioration en termes techniques. Ils ont dû comparer les quatre rondades de chaque sujet (les 2 pré-test et les 2 post-test) entre eux ; une cinquième rondade, celle de l'experte était

ajoutée. Le but était que la rondade de l'experte soit toujours considérée comme la meilleure et que les rondades au post-test soient également jugées meilleures que celles du pré-test. L'ordre de passation de jugement a été randomisé pour les deux juges (entre conditions et entre couples de vidéos à juger). En *annexe 4* se trouve un exemple de tableau Excel utilisé pour cette phase de jugement (pour la condition 1 *vidéo normal de l'expert*, toutes les combinaisons possibles qui ont été analysées pour 2 des 8 sujets). Les deux juges pouvaient regarder la vidéo seulement dans le plan sagittal, comme habituellement pendant les compétitions. Une possible difficulté résidait cependant dans le type de vidéo inhabituel pour eux : la reconstruction 3d. La question posée aux juges était toujours : « laquelle entre ces deux rondades est la meilleure ? ». La meilleure recevait un point. Chacune des 5 vidéos a eu un score total. Nous avons donc obtenu un classement pour chaque sujet, ce qui nous donnait suffisamment de données pour des analyses statistiques. En plus de cette évaluation, nous avons aussi effectué une analyse biomécanique des angles des articulations dans deux phases « clé » du mouvement : le passage à la verticale et la poussée finale en position C+. Nous avons trouvé les angles idéaux encore une fois grâce à notre référence (expert virtuel), et les avons comparés avec ceux de tous les sujets. Nous avons ainsi obtenu suffisamment de données à interpréter.

L'évaluation de notre étude de recherche est au final basée sur les résultats statistiques des deux analyses : évaluation subjective des juges et analyse biomécanique. Les tests statistiques nous informent s'il y a une différence significative entre pré- et post-test, s'il y a une différence significative entre les quatre conditions et s'il y a une corrélation entre les évaluations des deux juges. Grâce à ces résultats, nous pourrions vérifier notre hypothèse initiale.

9. Résultats

Afin d'évaluer les performances pré et post, nous avons mené plusieurs types d'analyse. La première très spécifique porte sur des caractéristiques biomécaniques attendues à des moments clés du mouvement. La seconde prend en considération l'évaluation d'un expert en gymnastique.

9.1 Analyses biomécaniques

Pour les différentes analyses biomécaniques, nous avons calculé la différence post-pré et comparé les différences obtenues pour les quatre conditions (types de feedback) en utilisant soit une *Anova*²⁵ pour mesures indépendantes, soit un test de *Kruskal-Wallis*²⁶ lorsque les données n'étaient pas paramétriques.

Du point de vue temporel, deux positions clé du mouvement rondade ont été choisies pour cette analyse : le passage à la verticale et la phase de poussée en C+ (voir chapitre *B. Le mouvement choisi – la rondade* pour en savoir plus).

Du point de vue spatial, grâce à l'application *Skeleton Player*, nous avons obtenu les données relatives aux angles des différentes articulations, ou encore « l'erreur » d'alignement d'un ensemble de segments (on sélectionnait ceux et celles qui nous intéressaient) dans ces deux positions clé.

Les angles obtenus pour chaque sujet ont ensuite été comparés avec ceux de *l'expert* (voir l'*annexe 5* pour les données « référence » de l'expert). En un premier temps, ça nous intéressait de noter la différence d'angle delta (Δ) entre sujet et expert. Plus le delta était petit, plus le sujet était similaire à la référence. Au final, nous voulions voir si une des quatre conditions se révélait plus proche de l'expert en ce qui concerne l'aspect biomécanique, et s'il y avait une amélioration au niveau postural entre pré- et post-test.

Verticalité

Nous commençons avec les analyses qui concernent la « verticalité ». L'expert, comme le montre la *figure 26*, est presque complètement à la verticale avec tout le corps (toutes les arti-

²⁵ L'*Anova* (*analysis of variance*) est un test statistique qui permet de comparer deux ou plusieurs groupes de données pour ce qui concerne la variabilité *intra* (à l'intérieur d'un même groupe) et *inter* (entre les différents groupes).

²⁶ Le test de *Kruskal-Wallis* (nom des auteurs) permet de vérifier l'égalité des médianes des différents groupes. C'est le correspondant non paramétrique de l'*Anova*, où les données sont remplacées par leur ordre (mesures ordinales). Ce test est généralement utilisé lorsqu'il n'y a pas une distribution normale.

culations sont alignées). Cette position est idéale. Tandis que dans la *figure 27*, nous voyons un « mauvais » exemple : angle dans les épaules, bassin pas à la verticale, jambes pliés.

Afin d'évaluer la verticalité, nous nous intéressons dans cette étude à trois différentes analyses: (1) une qui tient compte de la verticalité du haut du corps (tronc-bras, voir *figure 28*), (2) une autre pour le bas du corps (tronc-jambes) et (3) une pour la verticalité totale (somme des angles de toutes les articulations, déviation totale de la verticale idéale, voir *figure 29*).

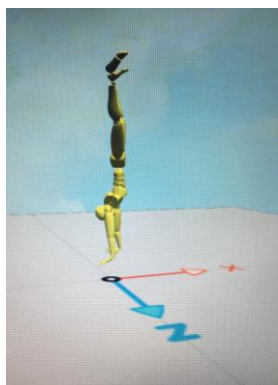


Figure 26. Capture d'image du passage à la verticale de l'expert (presque à 180°).



Figure 27. Capture d'image du passage à la verticale d'un des 32 sujets (mauvais exemple).

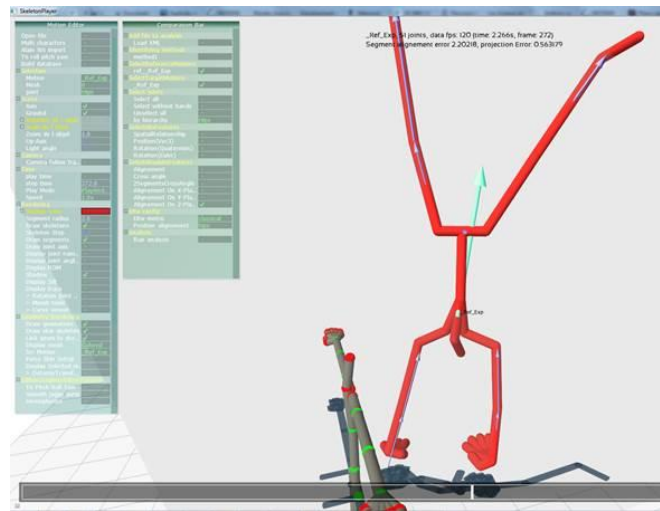


Figure 28. Utilisation de l'application *Skeleton Player*. Calcul de la somme d'angles pour les articulations sélectionnées (en vert et gris), en ce cas hanches-épaules-coudes-poignets (complexe tronc-bras).

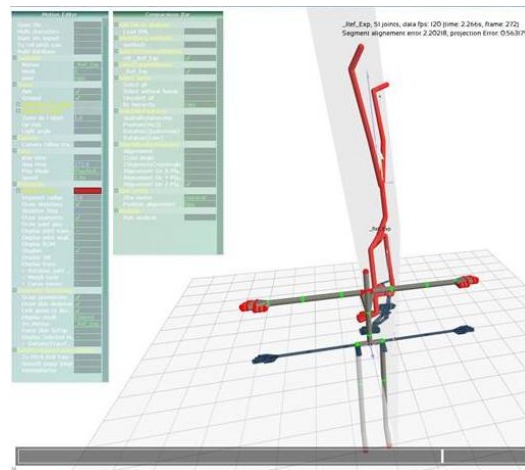


Figure 29. Utilisation de l'application *Skeleton Player*. Calcul de la somme d'angles pour les articulations sélectionnées (en vert et gris), en ce cas épaules-coudes-poignets-hanches-genoux-chevilles (totalité du corps).

(1) En ce qui concerne la verticalité du haut du corps (vérification du fléchissement au niveau du coude), aucune des quatre conditions expérimentales ne s'est révélée être meilleure d'une autre au post test (les angles sont restés presque les mêmes, ou l'amélioration a été trop petite). Il n'y a donc pas de différence significative entre les 4 méthodes de feedback ($F(3, 28) = 1.70, p = 0.19^{27}$), comme nous le voyons dans la figure 30.

²⁷ *P-value* ou seuil de signification. Si $p < .05$, le résultat du test statistique est significatif, ce qui signifie que le résultat observé a **moins de 5 %** de chances d'être obtenu par hasard. Au contraire, si $p > .05$, le résultat est non significatif.

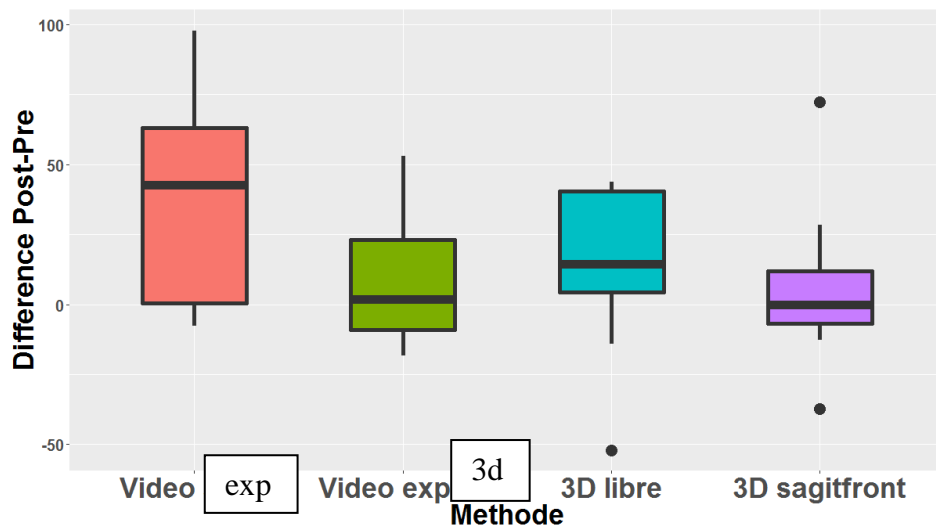


Figure 30. Box-plot²⁸ de la différence post-pré de la verticalité du haut du corps pour le quatre méthodes²⁹.

(2) Aussi en ce qui concerne la verticalité du bas du corps, aucune des conditions n'a permis d'amélioration significative de l'aspect postural. Il n'y a pas de différence significative entre les 4 méthodes de feedback (Kruskal-Wallis chi-squared (3) = 0.33, $p = 0.95$). Le box-plot en *figure 31* nous montre comment les médianes de toutes les conditions sont proches de 0, ce qui signifie aucune différence entre post- et pré-test.

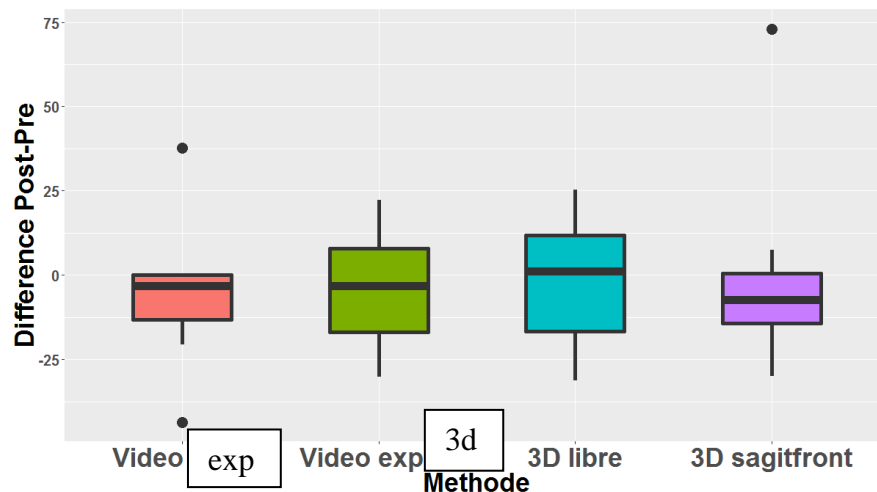


Figure 31. Box-plot de la différence post-pré de la verticalité du bas du corps pour le quatre méthodes.

²⁸ Graphique aussi appelé *boîte à moustaches*, qui montre les *quartiles 1 et 3* (limites de la boîte), la *médiane* (ligne à l'intérieur du rectangle), les *valeurs minimale et maximale* (limites des deux moustaches) et éventuellement les *valeurs extrêmes* (des points en dehors des moustaches).

²⁹ Compréhension de la légende des graphiques, méthodes : Video exp → condition 1, Video exp 3d → condition 2, 3D libre → condition 4, 3D sagitfront → condition 3.

(3) Dernier résultat pour le passage à la verticale : pas de différence significative entre les 4 méthodes de feedback (Kruskal-Wallis chi-squared (3) = 1.95, $p = 0.58$) pour la somme des angles (d'erreur, de déviation) de toutes les articulations (*figure 32*).

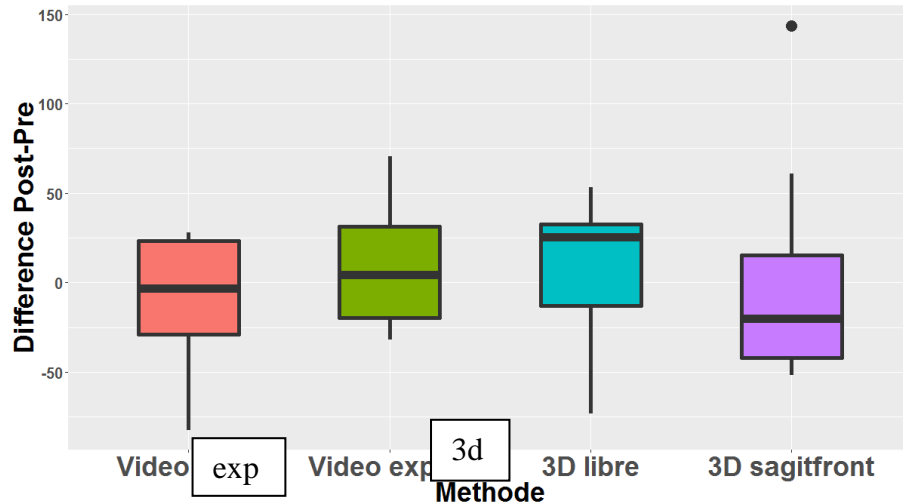


Figure 32. Box-plot de la différence post-pré de la verticalité totale du corps pour le quatre méthodes.

La poussée

Nous passons maintenant à l'autre posture clé : la poussée en C+ (voir *figure 33*). Comme déjà expliqué plus haut dans le chapitre dédié totalement à la rondade, la phase de C+ est fondamentale pour la bonne réussite du mouvement. Si les angles des épaules et des hanches sont cassés, donc si le corps n'est pas gainé et allongé au maximum (voir *figure 34*), toute l'énergie de la courbette (passage du C- ou C+) est perdue.

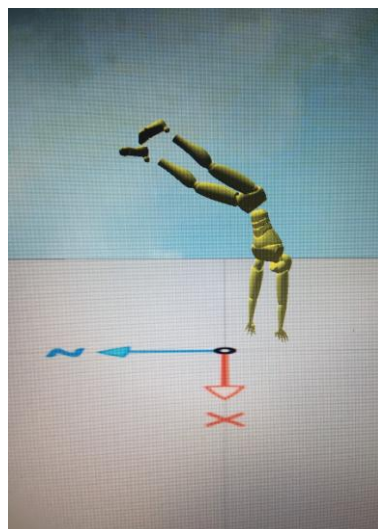


Figure 33. Capture d'image de la phase de poussée en C+ de l'expert (angle des épaules = 165°, angle des hanches = 132°).

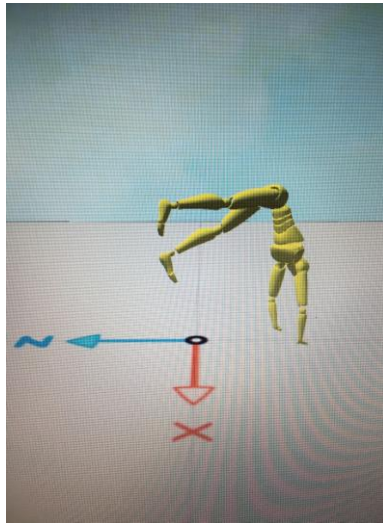


Figure 34. Capture d'image de la phase de poussée en C+ d'un des 32 sujets (mauvais exemple, angle des hanches complètement « cassé »).

Nous présenterons ici les résultats de la différence de variance sur l'ensemble des angles entre post- et pré-test pour les quatre conditions pour ce qui concerne l'angle des épaules et séparément l'angle du bassin (voir *figure 35*).

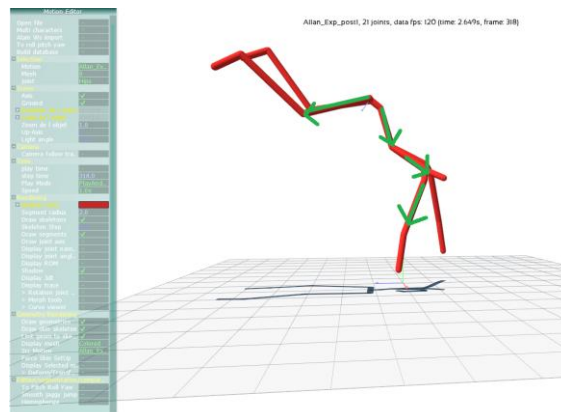


Figure 35. En vert, les flèches qui correspondent aux angles du bassin (pour la 1^{ère} analyse) et des épaules (angle utilisé = 180° - angle dans l'image, pour la 2^{ème} analyse) en position de poussée C+. Notre métrique d'erreur correspond à la variance des angles sélectionnés.

Pour l'angle des hanches (*figure 36*), il n'y a pas différence significative entre les 4 méthodes de feedback ($F(3, 28) = 1.08, p = 0.37$).

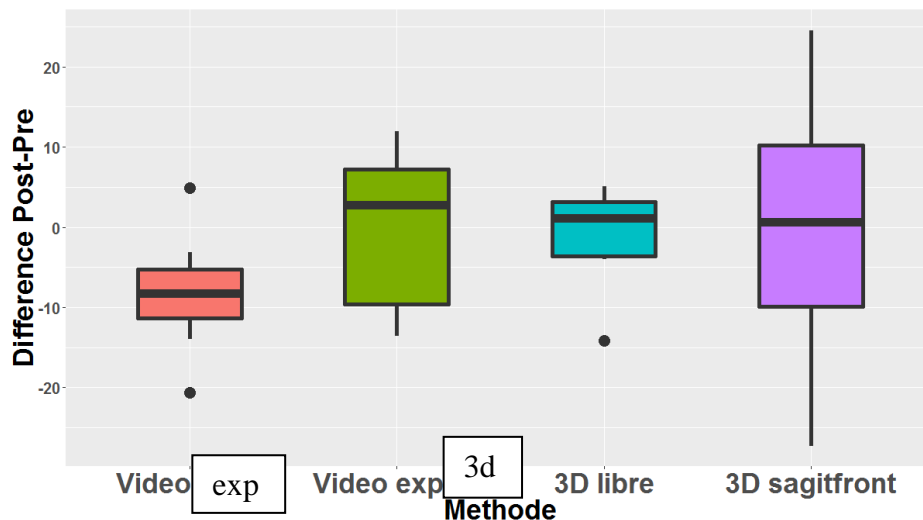


Figure 36. Box-plot de la différence post-pré de l'angle des hanches durant la C+ de poussée finale pour le quatre méthodes.

Pour l'angle des épaules (figure 37), aussi dans ce cas, il n'y a pas de différence significative entre les 4 méthodes de feedback ($F(3, 28) = 1.17, p = 0.34$).

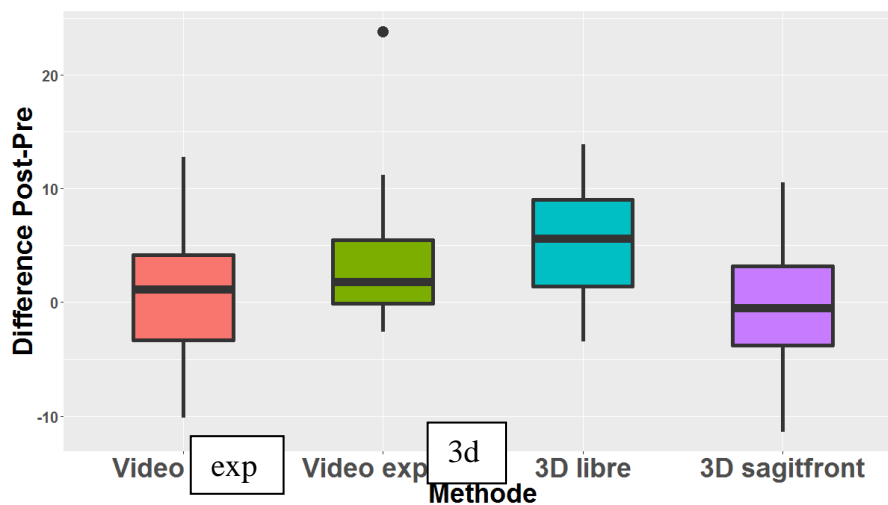


Figure 37. Box-plot de la différence post-pré de l'angle des épaules durant la C+ de poussée finale pour le quatre méthodes.

Tous les résultats obtenus pour la partie biomécanique ont été non-significatifs, mais seront quand-même traités dans le chapitre discussion.

9.2 Evaluation des juges

Nous passons maintenant à l'autre type d'analyse prévue : l'évaluation subjective des juges.

Un premier résultat important à noter est : dans 100% des cas, la performance de la séquence

de l'*expert* est jugée meilleure que la performance de la séquence à laquelle elle est comparée (64 points sur 64 possibles). Cela valide l'expertise de l'expert, ainsi que la capacité des juges à évaluer la performance. Deuxièmement, nous observons une bonne corrélation entre les évaluations effectuées par les deux juges, à savoir $R = 0.93^{30}$ si l'on conserve les séquences de la gymnaste experte, et $R = 0.62$ sans les séquences de la gymnaste experte (voir voir *figure 38*).

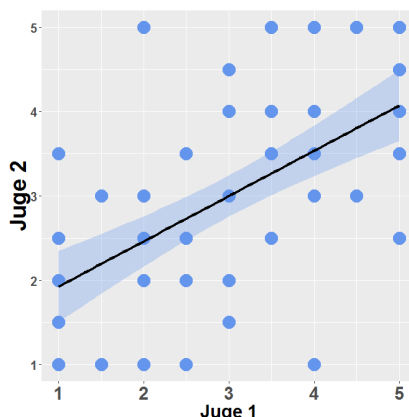


Figure 38. Corrélation ($R = 0.62$) entre le jugement du juge 1 et du juge 2 (sans tenir compte des évaluations de la performance de l'expert).

Pour les analyses qui suivent, les séquences de l'experte n'ont pas été incluses car elles biaiseraient les résultats (pour les raisons évoquées plus haut). Dans un premier temps, nous avons testé pour chaque juge et pour chaque méthode si les séquences post étaient évaluées comme significativement meilleures que les séquences pré. Pour cela, nous avons utilisé soit un *T-test*³¹ pour mesures répétées, soit un *Wilcoxon signed-rank test*³² lorsque les données étaient non paramétriques.

Voici les résultats pour le juge 1 (*figure 39*) :

- Pour ce qui concerne la méthode 1 (vidéo normal de l'expert), on observe une moyenne post-test de 4.5, nettement supérieure à celle du pré-test de 1.5. Nous observons une différence significative ($t(7) = -2.62, p < 0.05$), ce qui signifie une amélioration dans l'évaluation des performances du post-test.

³⁰ Le coefficient de corrélation linéaire, noté avec R est compris entre -1 et 1. Plus R est proche de 1 ou -1, plus la corrélation est grande.

³¹ Le T-test ou test de *Student* (nom de l'auteur) est utilisé en statistique pour vérifier si la valeur de la médiane d'une distribution est significativement différente d'une certaine valeur de référence ou pas.

³² Similaire au T-test, mais pour des données non paramétriques. Il permet de déterminer si deux échantillons appartiennent à la même population ou pas (même distribution ou pas).

- Pour la méthode 2 (vidéo 3d de l'expert), on observe une moyenne post-test de 3.25, supérieure à celle du pré-test de 2.75, mais pas suffisante pour être significative. Il y a eu une amélioration, mais selon le test de *Student* ($t(7) = 0.12, p > 0.05$), ce n'est pas significatif (ça pourrait être une différence due au pur hasard).
- Pour la méthode 3 (superposition 3d de l'expert et du sujet dans les plans sagittal et frontal), on observe une moyenne post-test de 4, nettement supérieure à celle du pré-test de 2. Nous observons donc une différence significative ($t(7) = -5.66, p < 0.01^{33}$), ce qui signifie une amélioration dans l'évaluation des performances du post-test.
- Pour la méthode 4 (superposition 3d de l'expert et du sujet librement dans tous les plans), on observe une moyenne post-test de 4.5, nettement supérieure à celle du pré-test de 1.5. Nous observons une différence significative ($t(7) = -4.41, p < 0.001$), ce qui signifie une amélioration dans l'évaluation des performances post-test.

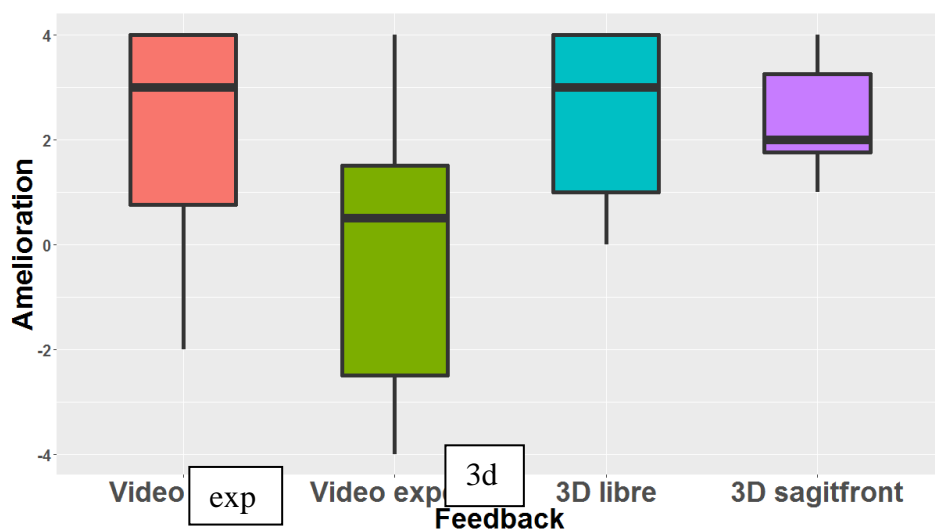


Figure 39. Box-plot du jugement d'amélioration (différence entre post et pré) du premier juge pour les 4 méthodes.

Nous passons maintenant au juge 2 (figure 40) :

- Pour la méthode 1 (Vidéo exp), on observe une moyenne post-test de 3.5, supérieure à celle du pré-test de 2.5. Nous observons une différence significative ($V = 0, p < 0.05$) entre évaluation du post et du pré (performances jugées meilleures au post).
- Pour la méthode 2 (Vidéo exp 3d), on observe une moyenne post-test de 3.25, légèrement supérieure à celle du pré-test de 2.75. Cette différence est non-significative ($t(7)$

³³La valeur $p < 0.001$ signifie qu'il y a seulement le 0,1% de chances que la différence soit due au hasard. $p < 0.001$ fait augmenter encore plus la significativité du test statistique.

= -1.07, $p > 0.05$). L'amélioration des performances ne peut être imputée au type de feedback.

- Pour la méthode 3 (3D sagitfront), on observe une moyenne post-test de 4.5, nettement supérieure à celle du pré-test de 1.5. Nous observons une différence significative ($V = 0$, $p < 0.05$), ce qui signifie une amélioration due effectivement à la méthode d'intervention.
- Pour la méthode 4 (3D libre), on observe une moyenne post-test de 3.5, supérieure à celle du pré-test de 2.5. La différence est significative ($t(7) = -2.88$, $p < 0.05$) ; on a une amélioration dans l'évaluation du post-test.

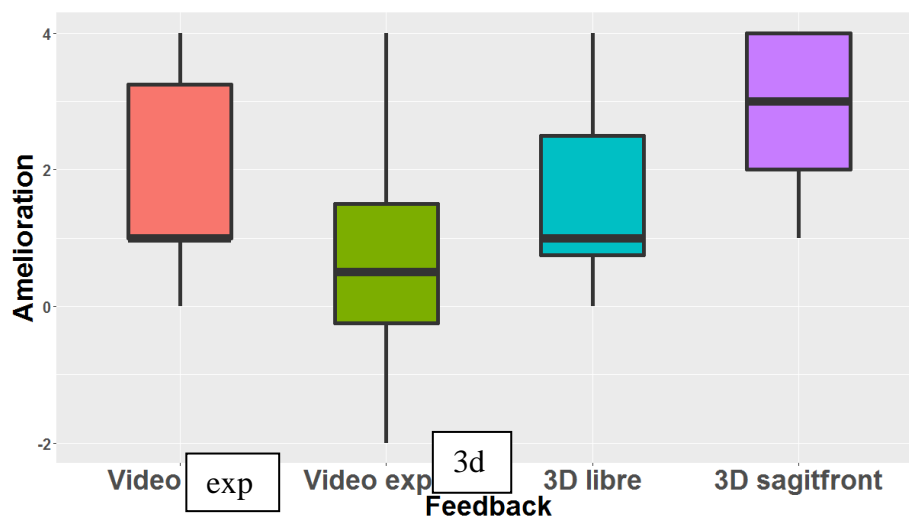


Figure 40. Box-plot du jugement d'amélioration (différence entre post et pré) du deuxième juge pour les 4 méthodes.

En résumant les résultats de l'analyse « perceptive » (subjective) des juges, avant d'en discuter dans le prochain chapitre, nous concluons que tous les types de feedback ont permis une amélioration (significative) de la performance telle qu'évaluée par les 2 juges, à l'exception du feedback montrant la vidéo de l'experte 3d.

Une dernière investigation a été faite : nous avons testé si les progrès (différence de points post-pré) induits par les 4 types de feedback étaient significativement différents, et ce pour chacun des 2 juges séparément. Pour cela, nous avons utilisé un *test de Friedman*³⁴ (car les données étaient non paramétriques). Pour le juge 1, nous n'avons pas obtenu une différence

³⁴ Ce test est utilisé pour comparer plus de deux échantillons dépendants, en termes de population. La comparaison est faite sur la médiane de la population.

significative entre les 4 méthodes (Friedman chi-squared (3) = 3.94, $p > 0.05$). Toutefois, un test post-hoc (avec correction pour comparaisons multiples) indique que l'amélioration résultant du feedback avec vidéo de l'experte est significativement moins importante que celle résultant du feedback 3d sagittal frontal. Pour le juge 2 non plus, nous n'avons pas observé une différence significative entre les 4 méthodes (Friedman chi-squared (3) = 6.80, $p > 0.05$ (0.08)).

10. Discussion

Nous arrivons finalement à la discussion des résultats : le résultat principal est que toutes les méthodes de feedback à l'exception de la vidéo de l'expert ont permis une amélioration de la performance (telle qu'évaluée par les juges), mais que les progrès obtenus avec les différentes méthodes ne diffèrent pas significativement. C'est le moment de faire un bilan sur l'efficacité des différentes méthodes de feedback vidéo utilisées. L'analyse biomécanique ne nous a pas donné les résultats espérés, étant donné qu'aucune des cinq analyses n'a montré des améliorations au niveau postural dans aucune des conditions. Au contraire, l'analyse subjective des juges soulignait la perception d'amélioration de la performance (à part dans la condition 2, où seulement la vidéo 3d de l'expert était montrée). Nous expliquons cette différence entre évaluation subjective et biomécanique de la manière suivante : il y a eu effectivement une baisse de qualité du mouvement au niveau des angles probablement due à la fatigue en phase de post-test (et peut être aussi par lassitude, étant donné la répétitivité de la tâche), mais le dynamisme et le mouvement dans son complexe (pas seulement les deux phases isolées) donnent lieu à une cohérence observée améliorée, puisque les juges évaluent généralement comme meilleures les rondades des post-test. Il serait intéressant d'effectuer des analyses biomécaniques prenant en considération le dynamisme et la coordination, pour voir s'il y a des changements entre pré- et post- à ce niveau-là (et peut être trouver des résultats congruents entre les deux types d'analyses).

Nous pouvons considérer les résultats de l'analyse des juges (celle qui nous intéressait le plus vu que le domaine pour lequel cette étude était conçue était *perception et contrôle moteur*³⁵) comme partiellement positifs ; « positifs » car il y a eu une amélioration, mais seulement « partiellement » car il n'y a pas une dominance des conditions 3 et 4 (celles qui concernent le FVVI) comme prévu dans notre hypothèse initiale. Nous pouvons faire l'hypothèse qu'une raison de la grande partie d'amélioration soit non pas le type de feedback mais le simple fait de *pratiquer* le mouvement. Comme expliqué en début de travail (dans le sous chapitre 2.1 *Définition et introduction*), la pratique est une des quatre variables qui influencent l'apprentissage moteur. Selon nous, un autre motif, qui explique de tels résultats, réside dans la tâche elle-même. La rondade est un élément difficile, qui requiert beaucoup de coordination ; une seule séance pour s'approcher de ce mouvement est trop limitatif. Il faudrait avoir plus de temps pour se familiariser avec le mouvement, mais aussi avec le feedback, et une ou

³⁵ Responsable de ce domaine des sciences du mouvement à l'Université de Fribourg est justement Jean-Pierre Bresciani, mon chef de projet.

plusieurs séances d'apprentissage. Il faudrait donc penser à une intervention sur le long terme. Ainsi, l'apprentissage serait reparti sur plusieurs séances, tandis que les effets d'amélioration et de rétention dus au type de feedback proposé pourraient être mieux détectés. Nous avons la preuve de l'étude (cité dans la partie 3.4 *Etat des travaux préliminaires*) de Quartacci et Strahm (2010) qui ont noté un apport bénéfique de la source vidéo seulement en un deuxième temps, durant une séance de rétention (pour un mouvement nouveau comme le lancer du disque, tâche qui peut être très bien comparé à la rondade pour les difficultés techniques et de coordination). Ce résultat nous suggère donc le bénéfice de prévoir aussi une phase de rétention.

Enfin, un dernier point expliquant l'absence d'amélioration (voir régression) lors des post-test, pourrait être la fatigue et la lassitude. Dans ce contexte, il est difficile de pouvoir comparer les méthodes entre elles.

Après cette première analyse et justification des résultats, nous répondons finalement à notre hypothèse initiale. La condition *3d expert* a été effectivement la pire (la seule à ne pas avoir eu une amélioration significative), comme prévu. Le fait de ne pas pouvoir avoir accès aux informations vidéo de soi-même (mais seulement d'utiliser ses propres informations proprioceptives, kinesthésiques et vestibulaires) limite sûrement le processus d'apprentissage. J'ai aussi noté que les participants dans cette condition, ne regardaient presque jamais la vidéo en vue frontale. Ça signifie qu'ils n'arrivaient pas à en tirer des informations utiles. Tandis que dans les conditions 3 et 4, ils ont utilisé ce point de vue plus fréquemment. Probablement, dans une situation de comparaison (les cas de superposition) la vue frontale leur donne des informations, sinon elle est considérée comme trop difficile.

Dans notre hypothèse initiale, nous avons prévu comme meilleures les conditions FVVI. Un seul résultat montre qu'il y a une amélioration significative dans cette condition (par rapport aux autres) : le feedback 3d du sujet superposé à l'expert dans les plans prédéfinis. Peut-être, cette condition a permis au sujet une bonne comparaison et identification étant donné que les deux humanoïdes 3d étaient similaires (l'effort cognitif de comparaison était minime vu que les caractéristiques physiques différentes des deux avatars étaient identiques, le sujet pouvant ainsi directement s'identifier à l'expert présenté à côté³⁶), tout en donnant une aide sur les points à analyser/observer.

³⁶ Mais la longueur des segments relative à la taille du sujet sont conservés (pour une analyse biomécanique sans biais).

La contrainte de visualisation seulement sur les deux plans (se concentrer sur une faute depuis les deux points de vue) s'est probablement révélée positive ; une sorte de canalisation d'information, une aide qui évite la dispersion du sujet, qui évite un surplus d'informations (exploitation libre de la condition 4) qui peut souvent nuire à l'apprentissage, surtout dans le cas de sujet novices. En ce qui concerne la condition 1, la vidéo normale de l'expert, nous pouvons confirmer qu'en étant une source plus familière, elle se révèle être bénéfique. Le fait de voir un vrai humain et pas un humanoïde peut influencer notre cerveau dans les processus d'identification et de transfert ? La prochaine étape serait-t-elle donc à présenter la vidéo 3d avec reconstruction de l'image du sujet (aspect physique), une reconstruction presque parfaite de la réalité en 3 dimensions ?

Nous revenons enfin à l'étude de Arbabi et Sarabandi (2016), présenté plus haut. Cette étude, très similaire à la nôtre, a montré comme chez nous que la condition où seulement un feedback de l'expert était donné n'était pas très utile dans l'apprentissage car celle-ci ne permettait pas d'avoir une comparaison directe mais seulement indirecte : entre représentation interne de soi et représentation externe de l'expert. Dans leur étude, la condition *combined-modeling* (notre superposition expert-sujet) a été effectivement la meilleure, mais ils ont prévu aussi une séance de rétention. Comme déjà mentionné plus haut, les effets du feedback virtuel sont selon nous plus « visibles » sur le long terme. Chose que nous n'avons pas testé dans notre expérience.

V. Critiques

Nous avons standardisé au mieux l'expérience, en cherchant à trouver les meilleures solutions à chaque aspect durant la planification. Toutefois, il est possible d'améliorer certains points pour une recherche future sur le même sujet. Nous les listons ci-après, en les discutant et en proposant des améliorations pour chacune.

Le premier aspect critique est *l'échauffement*. Pour cette expérience nous avons choisi un échauffement libre, étant donné que les participants étaient tous des étudiants en sport, qui connaissent bien leur corps et leurs besoins en termes d'échauffement musculaire et articulaire. Si au contraire les participants sont des débutants, ou si comme espéré, l'outil du FVVI se révélait être exploitable dans un contexte scolaire, il faudra penser à un échauffement standardisé. Dans notre contexte aussi, il aurait été mieux de proposer une suite d'exercices à exécuter.

ter pour tous, afin de standardiser encore plus la démarche et augmenter la fiabilité³⁷ expérimentale.

Deux autres critiques strictement liées ont été soulevées par quelques participants : le fait qu'il y ait *seulement deux tapis* et pas plus. Cela a gêné certains sujets dans la prise d'élan et/ou leur ont mis de la pression pour opérer un mouvement rectiligne. Deuxième critique : *le risque de glisser à cause des chaussures de la combinaison*. Ces deux points pourraient effectivement être contrôlés en créant une piste de tapis plus longue et dans le sens de la largeur (et pas de la longueur).

Un autre point à discuter est le fait que notre test prévoyait que des conditions « actives » (3 contrôle temporel et 1 temporellement + spatialement). En effet le sujet devait jouer la vidéo par lui-même (mais libre de faire au mieux de son point de vue). Pour une recherche future, une perspective serait de considérer une *condition passive*, où le sujet puisse focaliser son attention uniquement sur le feedback. Une vitesse donnée doit être choisie et proposée à tous les participants.

Il faut insister aussi sur les *positions de début et de fin de mouvement égales pour tous* les participants. Ça aide beaucoup les expérimentateurs, en vue du travail de découpage des vidéos pour les analyses biomécaniques. Nous avons cherché à standardiser (bras à côté des oreilles au début et à la fin) mais la consigne n'a pas toujours été suivie (d'où la nécessité de répéter les consignes).

Une dernière critique, s'observant uniquement en début de test (et malheureusement pas avant), est le fait d'avoir filmé l'expert (virtuel et en vidéo normale) *seulement d'un côté* (avec le pied droit comme dernier appui). Les participants effectuant la rondade de l'autre côté ont visualisé le feedback de l'expert (indépendamment de la condition) à l'inverse. Cet inconvénient a peut-être causé un effort cognitif supplémentaire pour eux, ce qui peut nuire au processus d'apprentissage. Pour des études futures, nous conseillons aux expérimentateurs de se soucier de cet aspect-là, pour donner des conditions d'apprentissage les plus équitables possibles.

³⁷ Critère de évaluation de la méthode scientifique, ensemble à la validité. Un test est fiable s'il est reproductible (dans le temps, par d'autres chercheurs, etc.).

VI. Conclusion

Le défi de ce travail était de montrer l'utilité pédagogique d'un nouveau type de feedback. Nous avons partiellement atteint notre objectif car les résultats n'ont pas été significatifs en ce qui concerne les attentes principales (et surtout pas congruents, entre les deux types d'analyses : biomécanique et perceptive). Comme déjà mentionné dans la discussion, il est possible que ce type de feedback ne soit pas optimal pour un mouvement d'une telle complexité avec des sujets de niveau aussi variable. Nous proposons aux étudiants qui choisiront cette thématique pour leur mémoire de master (ou à d'autres chercheurs intéressés par la thématique) de planifier une expérience où le pré-test et le post-test ne sont pas prévus le même jour. Et d'ajouter aussi une séance d'apprentissage entre les deux. Cela se répercutera à travers une logistique plus complexe mais selon nous cela vaut la peine d'investiguer dans cette direction. Une expérience conçue en trois temps permettrait d'éviter la fatigue de l'exercice (33 rondades à la suite sont effectivement une charge élevée, surtout pour qui n'est pas habitué à ce genre de mouvements), la lassitude (moins de répétitions à exécuter et ça dure moins de temps) et permettrait de vérifier si la méthode utilisée a un impact sur le long terme (phase de rétention). En effet, apprentissage signifie acquisition d'une connaissance/habilité/etc. sur le long terme. Alors pourquoi ne pas tester l'utilité du FVVI sur une période de quelques semaines, voire quelques mois ?

Après avoir donné notre avis sur les perspectives futures de recherche, nous arrivons à la conclusion de notre travail avec un bilan de la situation actuelle et des aspects positifs et négatifs que nous avons constatés grâce à cette investigation. A travers les différentes sections sur la littérature, les commentaires des participants, ainsi que les résultats, ce mémoire fait émerger un grand nombre de concepts liés aux différents apprentissages par feedback. Ce qui reste à définir et à optimiser sont tous les « détails » liés à la fréquence, à la vitesse, au type, etc. de visualisation (voir chapitre 3. *La notion de feedback* pour en savoir plus). Idéalement, ces aspects doivent être en adéquation avec la gestuelle à apprendre, l'âge et le niveau du sujet ; il faut donc continuer à étudier ces aspects pour optimiser le protocole.

La question du retour verbal (de l'entraîneur ou du professeur) reste encore ouverte. Certaines études montrent que ça aide (en combinaison avec la vidéo), d'autre pas. Dans un contexte scolaire, ce point reste selon moi un moyen indispensable, sans lequel l'enseignant et les élèves perdent un peu leurs rôles. En effet, l'être humain est par nature social. Cela vient des aspects émotionnels (partage avec l'autre) et de l'appartenance à un groupe. L'information

transmise par un humain devrait donc capturer l'attention des élèves (du moment qu'il y a un minimum d'intérêt pour l'instructeur et la tâche). Les petits enfants nécessitent clairement une information verbale, pour être guidés dans la découverte des erreurs principales. Par exemple, un seul mot peut suffire pour qu'ils comprennent tous seuls l'erreur ils ont commise ; ils mettent ensuite en place des stratégies de résolution. Comme enseignant, il faut savoir se gérer : ne pas trop parler, mais donner des retours verbaux adaptés à la situation, à l'exercice, de classe, individuels, etc. Selon moi, l'objectif final d'un enseignant devrait être d'amener tous les élèves à l'accomplissement, ce que Sternberg (2002, p. 3) appelle "*teaching for successful intelligence*"³⁸. L'objectif final est donc de savoir utiliser les forces et les faiblesses de chaque élève (par rapport aux méthodes d'apprentissage choisies). Pour cette raison, il ne faut pas oublier aussi les autres modalités de feedback : l'explication à travers le corps, la mimique faciale, les mesures objectives, les retours entre élèves,... (chaque élève a sa modalité préférée, selon ses points forts). Le FVVI a sûrement plus de points positifs que négatifs : il est ludique, intéressant, utile et innovateur. Mais malheureusement, il pose des difficultés d'organisation (un seul sujet à la fois) et coute cher : le programme informatique, le matériel et son installation (caméras, ordinateurs, combinaisons, capteurs,...), ou encore la salle de capture. Le programme demande en outre des compétences spécifiques en traitement du signal (disciplines des mathématiques et de l'informatique), lesquels doivent impérativement être maîtrisées par l'entraîneur qui suit l'athlète ou alors il faut pouvoir payer quelqu'un capable d'utiliser le matériel (mais cela crée des coûts encore plus importants).

Pour le moment, cette application est selon nous une possibilité intéressante surtout pour les sportifs d'élite ; pour l'optimisation d'un mouvement déjà acquis (correction de fautes techniques très fines) ou dans la acquisition d'un mouvement nouveau sur le long terme (construction graduelle et correcte de toutes les phases du mouvement). Pour l'utilisation dans le cadre scolaire, nous pensons qu'il pourrait être intéressant de proposer le FVVI aux élèves au moins une fois dans leur parcours de formation afin d'apprendre l'existence d'un tel outil et comme apport pédagogique permettant une différenciation majeure (travail individualisé) et une motivation accrue (à travers l'attrait qu'il peut y avoir sur le plan technologie mais également par le côté ludique).

38

https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjblcHn9Y_VAhVLJFAK-HaYfD4IOFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.indiana.edu%2F~futures%2Fstbg.doc&usg=AFQjCNHrV00jrFGnq58zSe13048yUxOpew

Pour conclure, soulignons encore une fois la potentialité du FVVI sur le long terme et nous proposons aux futurs chercheurs d'effectuer des investigations aussi sur le dynamisme du mouvement (et pas seulement sur les angles articulaires) en ce qui concerne la biomécanique, étant donné la possibilité d'exploiter cet aspect cinématique avec le programme informatique. En effet, c'est le dynamisme selon nous l'*explication-clé* de la différence entre les résultats de la perception subjective des juges et les résultats purement biomécaniques (obtenus dans notre recherche).

VII. Sources

11. Bibliographie

- Anderson, F., Grossman, T., Matejka, J., & Fitzmaurice, G. (2013). YouMove: enhancing movement training with an augmented reality mirror. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology* (pp. 311-320). ACM.
- 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. Faculty of Physical Education and Sports Science, University of Zabol, Iran.* 41-45.
- Bandura, A. (1976). *L'apprentissage social*. Bruxelles: Mardaga.
- Baumberger, B. (2013). De la formation à la pratique feedback vidéo : quatre questions clés. *Prismes revue pédagogique Hep Vaud, 19.* 48-49.
- Bellagamba, B. (2017). Apprentissage du lancer au football américain par feedback virtuel interactif (Mémoire de master, Université de Fribourg).
- Blandin, Y. (2002). L'apprentissage par observation d'habiletés motrices: un processus d'apprentissage spécifique?. *L'année psychologique, 102*(3), 523-554.
- Buekers, M. J. (1995). L'apprentissage et l'entraînement des habiletés motrices et sportives. *Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissage*. Paris: PUF.
- Chua, P. T., Crivella, R., Daly, B., Hu, N., Schaaf, R., Ventura, D., ... & Pausch, R. (2003). Training for physical tasks in virtual environments: Tai Chi. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE* (pp. 87-94). IEEE.
- Cosmopoulos, A. (1999). La relation pédagogique, condition nécessaire de toute efficacité éducative. *Revue française de pédagogie, 97-106.*
- Cours de Méthodes quantitatives de recherche et analyse de données, Prof. Bresciani, 2016, Université de Fribourg.

Cours de Principes de l'entraînement, Prof. Lüthi, 2017, Haute école fédérale du sport de Maccolin.

Cours de Psychologie du développement, Prof. Camos, 2012, Université de Fribourg.

Cours de Psychologie sociale, Prof. Wagner, 2012, Université de Fribourg.

Cours de Psychologie du sport, Prof. Dubois, 2016, Université de Fribourg

Cours de Psychologie du sport, Prof. Le Naour, 2016, Université de Fribourg.

Cours de Sciences du mouvement, Prof. Taube, 2016, Université de Fribourg.

Dévaud, T. (2016). Apprentissage du Mawashi-Geri par la réalité virtuelle (Mémoire de master, Université de Fribourg).

Flor, H. (2013). Chapitre 10 : l'imagerie motrice et entraînement ou apprentissage avec la boîte noire. In *Thérapie à médiation corporelle et douleur* (p. 177 – 188). Institut UPSA de la douleur.

Fonseca, B., & Guinand, A. (2012). Le *feedback* vidéo en EPS (Doctoral dissertation, Haute école pédagogique du canton de Vaud).

Gros, L., & Clerc, G. (2013). L'utilisation de la vidéo et de la métacognition pour faciliter l'apprentissage en Éducation Physique et Sportive (IUFM Grenoble - Institut universitaire de formation des maîtres - Académie de Grenoble).

Guadagnoli, M. A., Dornier, L. A., & Tandy, R. D. (1996). Optimal length for summary knowledge of results: the influence of task-related experience and complexity. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 67(2), 239-248.

Guadagnoli, M., Holcomb, W., & Davis, M. (2002). The efficacy of video feedback for learning the golf swing. *Journal of sports sciences*, 20(8), 615-622.

Hadwin, A. F., Järvelä, S., & Miller, M. (2011). Self-regulated, co-regulated, and socially shared regulation of learning. *Handbook of self-regulation of learning and performance*, 30, 65-84.

Le Naour, T. (2016). Workshop Perception, cognition et contrôle moteur dans le sport (pdf pour un cours de l'Université de Fribourg).

Magill, R. (1993). Augmented *feedback* in skill acquisition. In R.N. Singer, M. Murphy & L.K. Lemant (Eds). *Handbook of research on sport psychology*, New York, 193- 212.

Mauroux, L., Dehler Zufferey, J., Jimenez, F., Wehren, R., Cattaneo, A., & Gurtner, J. L. (2013). Autorégulation des apprentissages et dossiers de formation en formation professionnelle. *L'apprentissage autorégulé: Perspectives théoriques et recherches empiriques* (Mémoire de Master, Université de Fribourg).

Merian, T., & Baumberger, B. (2007). Le feedback vidéo en éducation physique scolaire. *Staps*, 2(76), 107-120.

Mohnsen, B. S. (2001). *Using technology in physical education* (3d ed.). Cerritos: Bonnie's Fitware.

Newell, K. M., & Walter, C. B. (1981). Kinematic and kinetic parameters as information feedback in motor skill acquisition. *Journal of human movement studies*, 7(4), 235-254.

Roosink, M., Robitaille, N., McFadyen, B. J., Hébert, L. J., Jackson, P. L., Bouyer, L. J., & Mercier, C. (2015). Real-time modulation of visual feedback on human full-body movements in a virtual mirror: development and proof-of-concept. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 2.

Ressort ginnastica agli attrezzi (FSG) / Settore attrezistica (ACTG). (2015). Direttive Ginnastica attrezistica individuale femminile e maschile 2014. Arau: Federazione svizzera di ginnastica.

Rothstein, A. L., & Arnold, R. K. (1976). Bridging the gap: Application of research on videotape feedback and bowling. *Motor skills: Theory into practice*, 1, 35-62.

Rüdisühli, R. (2002). *Feedback vidéo : en piste avec la caméra*. Mobile, 6 (02).

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), 355-386.

Schmidt, R. A., & Debû, B. (1993). *Apprentissage moteur et performance* (p. 171). Paris: Vigot.

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(6), 749-785.

Viau, R. (2003). *La motivation en contexte scolaire*. De Boeck Supérieur.

Wolfs, J. L. (1992). Métacognition et éducation: quelques pistes de réflexion. *Revue belge de psychologie et de pédagogie*, (10), 25-31.

Wolfs, J. L. (1998). *Méthodes de travail et stratégies d'apprentissage: Du secondaire à l'université. Recherche, théorie, application*. De Boeck Université.

Wulf, G., Lee, T. D., & Schmidt, R. A. (1994). Reducing knowledge of results about relative versus absolute timing: Differential effects on learning. *Journal of motor behavior*, 26(4), 362-369.

12.Sitographie

Apprendimento [Dizionario] (s.d.). Accès à l'adresse http://www.grandidizionari.it/Dizionario_Italiano/parola/A/apprendimento.aspx?query=apprendimento

Apprentissage moteur [Wikipedia]. (s.d.). Accès à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_moteur

Axes et plans [Google images]. (s.d.). Accès à l'adresse <https://www.google.ch/imghp?hl=it&tab=wi&ei=QgBeWYvXAYbcUfrps6gM&ved=0EKouCByoAQ>

La relation pédagogique [Sydologie] (s.d.). Accès à l'adresse <http://sydologie.com/2013/10/pedagogie-et-andragogie-soyons-precis/>

Le Her, M. (2004). Les théories de l'apprentissage des habilités motrice. Accès à l'adresse http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/edu_mot3/ahm2.pdf

Métacognition (s.d.). Accès à l'adresse <https://sites.google.com/site/ideesash/pedagogieressources/metacognition>

Neurone miroir [Wikipedia] (s.d.). Accès à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone_miroir

Raising the Achievement of all Students: Teaching for Successful Intelligence (s.d.). Accès à l'adresse https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjblcHn9Y_VAhVLJFAKHAYfD4IQFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.indiana.edu%2F~futures%2F_stbg.doc&usg=AFQjCNHrVV0jrFGnq58zSe13048yUxOpew

Ruolo del docente e dell'allievo (s.d.). Accès à l'adresse <http://www.ilsileno.it/2013/01/20/il-nuovo-ruolo-del-docente-da-depositario-assoluto-del-sapere-a-guida-propositiva/>

Schéma général de la théorie en boucle fermée de Adams (s.d.). Accès à l'adresse http://eaiao.envsn.fr/Perf_sportive/niveaux_controle/texte/organisation_motricite/schema_general.htm

Sviluppo del sistema nervoso nel neonato [Enciclopedia Treccani] (s.d.). Accès à l'adresse [http://www.treccani.it/enciclopedia/sviluppo-del-sistema-nervoso-nel-neonato_\(Dizionario-di-Medicina\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/sviluppo-del-sistema-nervoso-nel-neonato_(Dizionario-di-Medicina)/)

VIII. Annexes

Annexe 1 : tableau Excel utilisé pour la formation des groupes expérimentaux et pour l'organisation des passations au laboratoire.

Nom du sujet	Niveau rondade	Passation	Sexe	Condition
Coralie A.	D	V, 24.03, 8h	F	1
Antony	D	V, 7.04, 13.30	H	4
Thomas	M	V, 24.03, 13h	H	4
Allan	M	L, 27.03, 16h	H	2
Chloé	M	L, 10.04	F	2
Marco	D	V, 7.04, 15.30h	H	3
Yannick	A	L, 10.04	H	2
Gaetan	A	M, 4.04, 9h	H	1
Lisa T.	M	V, 31.03, 9.30	F	3
Roman	A	L, 03.04, 14.30	H	4
Lisa P.	M	V, 7.04, 12.30	F	4
Marielle	D	V, 7.04, 11h	F	4
Quentin	D	V, 31.03, 11h	H	2
Jordan	M	L, 27.03, 16.30	H	2
Titti	D	M, 4.04, 14.30	H	4
Lionel	M	L, 27.03, 13h	H	3
Marina	M	L, 03.04, 11h	F	1
Enea	M	V, 7.04, 8h	H	4
Mel	A	V, 31.03, 12h	F	1
Fabu	A	M, 4.04, 15.30	H	1
Chris	M	V, 24.03, 9.45	H	3
Coralie G.	D	V, 24.03, 11.45	F	3
Elia	M	V, 7.04, 10h	H	3
Domi	A	L, 27.03, 14h	H	1
Giona	M	V, 7.04, 14.30	H	4
Rudy	D	L, 3.04, 18.30	H	1
Ardian	M	V, 7.04, 16.30	H	3
Joan	A	M, 4.04, 10h	H	3
Benoit	M	M, 4.04, 12h	H	1
Nicole	A	L, 03.04, 15.30	F	2
Laura	D	L, 10.04	F	2
Theresa	M	L, 10.04	F	2

vidéo normale experte (pl. S e F)
3D experte (pl. S e F.)
3D experte + sujet (pl. S e F)
3D experte + sujet TOUS LES ANGLES

	COND 1	COND 2	COND 3	COND 4
D	2	2	2	3
M	2	4	5	4
A	4	2	1	1
F	3	4	2	2
H	5	4	6	6

Annexe 2 : Note d'information présentée à tous les sujets avant de commencer la procédure de test.

Note d'information aux participants de l'étude

La nature de l'étude

C'est une étude dans le cadre d'un travail de Master en sciences du mouvement et du sport, option enseignement, Université Fribourg.

Le but

Le but est d'investiguer **les différents types de feedback vidéo**, et de voir **lequel est plus bénéfique** dans un apprentissage moteur défini : la rondade (élément gymnique au sol).

La durée

Il s'agit d'une seule phase de test **d'une heure environ**, où le participant doit effectuer **33 rondades** en plusieurs blocks et **visualiser**, après chaque block, **un feedback** relatif, selon la condition de test où il a été assigné.

Les effets

Les effets prévus sont un apprentissage au cours de la séance et une amélioration de performance visible dans l'exécution de la gestuelle.

Les risques

On a aucun risque particulier. Peut être à fin séance, le participant se sent un peu fatigué, mais c'est normalement dû à l'effort physique effectué.

Annexe 3 : Consentement de participation à l'étude signée par tous les sujets testés.

Département de médecine
Université de Fribourg

Consentement pour l'étude « Le feedback vidéo dans l'apprentissage moteur »

Je, soussigné, certifie :

- Avoir lu, compris et accepté l'information contenue dans la « **Note d'information aux participants de l'étude** ».
- Que j'ai pu poser toutes les questions souhaitées et que j'ai reçu des réponses satisfaisantes.
- Etre informé que je peux me retirer à tout moment de l'étude et sans préjudice.
- Etre 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.
- Etre 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: _____ Prénom: _____

Signature:

Personne ayant conduit l'entretien de consentement

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

Nom: _____ Prénom: _____

Signature:

Annexe 4 : exemple de tableau Excel avec ordre randomisé utilisé par l'évaluation des vidéos par les juges (mais rempli par moi expérimentateur).

Gymnast	First	Second	Response
gymnast_1	Pre1	Post1	Post1
gymnast_1	Post1	Post2	Post1
gymnast_1	Pre2	Reference	Ref
gymnast_1	Pre2	Post1	Post1
gymnast_1	Pre1	Pre2	Pre2
gymnast_1	Pre1	Post2	Post2
gymnast_1	Post1	Reference	Ref
gymnast_1	Pre2	Post2	Post2
gymnast_1	Pre1	Reference	Ref
gymnast_1	Post2	Reference	Ref
gymnast_1	Post1	Pre1	Post1
gymnast_1	Post2	Pre1	Post2
gymnast_1	Pre2	Pre1	Pre2
gymnast_1	Post2	Post1	Post2
gymnast_1	Reference	Pre1	Ref
gymnast_1	Reference	Post1	Ref
gymnast_1	Reference	Pre2	Ref
gymnast_1	Post2	Pre2	Post2
gymnast_1	Reference	Post2	Ref
gymnast_1	Post1	Pre2	Post1
gymnast_2	Pre2	Post2	Post2
gymnast_2	Pre1	Post2	Post2
gymnast_2	Pre2	Reference	Ref
gymnast_2	Pre1	Pre2	Pre2
gymnast_2	Pre2	Post1	Post1
gymnast_2	Post1	Reference	Ref
gymnast_2	Pre1	Post1	Post1
gymnast_2	Post1	Post2	Post2
gymnast_2	Pre1	Reference	Ref
gymnast_2	Post2	Reference	Ref
gymnast_2	Pre2	Pre1	Pre2
gymnast_2	Reference	Pre2	Ref
gymnast_2	Post2	Post1	Post2
gymnast_2	Post1	Pre2	Post1
gymnast_2	Reference	Post1	Ref
gymnast_2	Post2	Pre1	Post2
gymnast_2	Post1	Pre1	Post1
gymnast_2	Post2	Pre2	Post2
gymnast_2	Reference	Post2	Ref
gymnast_2	Reference	Pre1	Ref

Annexe 5 : angle de référence de l'expert (pour les analyses biomécaniques)

	Ref
DeltaTroncBrasVert	32.9478
SommeErreurJambesBassinVert	24.28699
SommeErreurVerticalite	32.28415
AngleBassinCplus	132
DeltaAngleBassin	0
AngleEpaulesCplus	165
DeltaAngleEpaulesCplus	0

Annexe 6 : déclaration personnelle.

Déclaration personnelle

Cette déclaration personnelle doit être remise avec la version finale du travail de Master. Par la signature de ce formulaire, l'étudiant-e reconnaît avoir pris connaissance des conséquences en cas de violation des règles de bonne pratique scientifique dans la rédaction d'un travail écrit.

Conséquences en cas de plagiat :

Lorsque le/la référent-e ou un-e conseiller-ère découvre un cas de plagiat, il/elle a l'obligation d'en informer la direction des études. La réglementation détaillée concernant le délit de plagiat est disponible au lien suivant : www.unifr.ch/rectorat/reglements/pdf/1_1_15.pdf.

Déclaration sur l'honneur :

"Par ma signature, j'atteste avoir rédigé personnellement ce travail écrit et n'avoir utilisé que les sources et moyens autorisés, et mentionné comme telles les citations et les paraphrases."

Déclaration du droit d'auteur :

J'ai pris connaissance du fait que le présent travail est partie intégrante de mes études, que l'ensemble des droits d'auteur (comprenant notamment le droit de publication, les droits d'usage gratuit ou commercial) est cédé à l'Université de Fribourg, que l'Université ne peut disposer du droit de cession à des tiers sans accord préalable, et que, dans le cadre de ce régime, je ne peux faire valoir aucun droit pécuniaire.

Étudiant-e

Prénom

Chiara

Nom

Rè

Titre

Le feedback vidéo dans l'apprentissage moteur - Apprentissage de la rondade par feedback délayés

Lieu, Dates

Biasca, 19.07.2017

Signature étudiant-e

Chiara Rè

IX. Remerciements

De manière générale, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Cependant, je tiens à distinguer certains acteurs sans qui ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Un énorme merci aux 32 sujets (amis, copains ou simplement étudiants en sport très disponibles) qui ont pris du temps pour venir passer mon expérience.

Un énorme merci aux 2 juges fédéraux de mon club de gymnastique (SFG Biasca) : Deborah Pedimina et Céline Robert-Nicoud pour l'évaluation des rondades, phase fondamentale pour le recueil des données.

Merci aussi à l'Université de Fribourg, pour la chance que j'ai eu de profiter d'une salle équipée de pareils outils technologiques.

Last but not least... merci à mes référents :

Mon chef de projet Jean-Pierre Bresciani, qui m'a beaucoup aidé dans la définition du plan d'expérience et les analyses statistiques avec son expertise et sa rigueur méthodologique impeccable.

Mon conseiller Thibaut le Naour, qui m'a beaucoup aidé dans l'organisation et la passation de l'expérience en laboratoire. J'en profite pour lui adresser une félicitation toute particulière pour la qualité et la précision de son logiciel *Motive* qui nous a permis de proposer un FVVI à la hauteur des attentes.

Leur attitude positive, leur enthousiasme pour ma recherche et leur disponibilité m'ont beaucoup motivé dans la réalisation de ce travail, qui a été le dernier défi personnel de mon parcours académique à l'université de Fribourg.