

Feedback vidéo virtuel interactif et feedback vidéo appliqués au saut en hauteur

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

déposé par

Coralie Gibson

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. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller

Thibaut Le Naour

Fribourg, octobre 2017

Table des matières

Résumé.....	3
1 Introduction	4
1.1 Le saut en hauteur.....	4
1.2 Les feedbacks	7
1.3 Le feedback vidéo et le saut en hauteur	11
1.4 Objectif du travail.....	12
2 Méthode.....	13
2.2 Design de l'étude.....	13
2.3 Description détaillée des méthodes et des instruments de recherche.....	14
2.4 Interventions.....	14
2.5 Evaluation et analyse statistique des données	15
3 Résultats	17
3.1 Résultats des analyses biomécaniques	17
3.2 Résultats de l'analyse de l'entraîneur national.....	22
4 Discussion	24
4.1 Un feedback meilleur que les autres ?.....	27
4.2 Améliorations pour de futures recherches.....	28
5 Conclusion.....	30
Bibliographie	31
Annexes	36
Remerciements	38

Résumé

Lors de l'apprentissage, qu'il soit d'ordre physique ou intellectuel, le feedback est indispensable. De ce fait, nous avons cherché à analyser les améliorations du saut en hauteur en « fosbury-flop », à l'aide d'un feedback vidéo. Le fait de donner un feedback permet d'augmenter l'attention de l'athlète et lui permet aussi de mieux comprendre ses erreurs et d'avoir une meilleure représentation du mouvement à effectuer. Différentes applications ont été créées afin de faciliter le travail de l'entraîneur et lui permettre de donner de meilleurs feedbacks. Les apprenants sont aussi avantageés et peuvent utiliser ces applications pour s'auto-corriger. Dans notre travail, nous avons utilisé l'application SkeletonPlayer – qui offre un feedback vidéo virtuel interactif (FVVI) – afin d'analyser si des améliorations étaient visibles lorsque le FVVI montrait le modèle à recopier et la capture numérique du mouvement du sujet simultanément.

32 sujets âgés de 23.4 ± 2.4 ans ont participé à l'étude. Ils devaient effectuer 3 sauts en hauteur pour les pré-tests, 9 x 2 sauts en phase d'apprentissage et 3 sauts post-test. Suite aux pré-tests et aux sauts d'apprentissage, les sujets recevaient un feedback vidéo en deux (VID) ou trois dimensions (FVVIlex), avec la possibilité de se comparer à un expert (FVVIlibre et FVVIplan).

Des améliorations significatives ont été trouvées lors de l'analyse spatiale pour les groupes FVVIplans ($p < 0.01$) et FVVIlibre ($p < 0.05$) et l'analyse de l'angle du pied par rapport à la barre a montré des résultats significatifs pour les groupes VID (amélioration, $p < 0.05$) et FVVIplans (régression, $p < 0.05$). Les autres analyses (temporelle, angle du genou, des coudes et perpendicularité par rapport à la barre) n'ont montré aucun résultat significatif. Une différence significative a été trouvée entre les groupes lors de l'analyse de l'angle du pied par rapport à la barre. Le groupe VID est significativement différent des groupes FVVIplans et FVVIlibre. L'analyse des résultats de l'entraîneur national a montré des améliorations significative pour VID ($p < 0.05$) et FVVIlibre ($p < 0.01$), les deux autres groupes ont également progressés.

Le FVVIlibre semble être le feedback qui permet la meilleure progression. Cette méthode permettait aux sujets d'observer leur mouvement en simultané avec celui de l'expert, depuis n'importe quel angle de vue. Ils pouvaient donc analyser tous les détails et corriger leurs erreurs efficacement. Cependant, cette technologie est difficile d'accès et l'utilisation d'un feedback vidéo, qui a également conduit à des améliorations significatives, reste une bonne alternative.

1 Introduction

1.1 Le saut en hauteur

Le saut en hauteur est une discipline technique de l'athlétisme. Le saut peut être subdivisé en trois ou quatre parties. Il se compose d'une phase d'élan, d'une phase d'appel et d'une phase de franchissement (ou d'esquive) de la barre ; la quatrième partie est la phase d'atterrissage (Blažević, Antekolović, & Mejovšek, 2006). Dans notre étude, nous allons nous baser sur un saut en trois phases et n'allons donc pas considérer la phase d'atterrissage, puisqu'elle ne joue pas un rôle prépondérant à la réussite d'un saut. Il existe différentes techniques de saut en hauteur. Dans ce travail, nous allons analyser la technique « fosbury-flop » qui consiste à franchir la barre de dos, avec le corps perpendiculaire à celle-ci (Dapena, 2002).

La première phase – l'élan – se compose d'une dizaine de pas et est primordiale pour la suite du mouvement, puisqu'elle prépare la phase d'appel (Dapena et Ficklin, 2007). Au début de cette phase, l'athlète peut décider s'il fera quelques petits pas supplémentaires ou s'il partira à l'arrêt. A la fin de cette phase, lors du dernier ou des deux derniers pas, le sauteur amène ses bras vers l'arrière, pour ensuite les tirer vers l'avant et le haut afin d'accompagner le saut vers la verticale (Dapena, 1996). L'approche se fait sous forme de courbe, afin de baisser le centre de gravité et incliner le corps dans le sens opposé à la barre lors de l'appel (Dapena, 2002). Farley et Gonzalez (1996) confirment son importance pour réussir un saut optimal. Une bonne inclinaison permet à l'athlète de ne pas devoir s'incliner au-dessus de la barre et de pouvoir mettre une totale attention sur son franchissement (phase trois du saut). Les deux derniers pas de la phase d'élan devraient être rapides, si le saut veut être optimal (Dapena et Ficklin, 2007). Cette phase est un point clé pour le saut, car une bonne vitesse emmagasinée permettra à l'athlète de franchir la barre. Sans vitesse, il ne serait pas possible de passer la barre et le sauteur retomberait à l'endroit même de son appel (Laffaye, 2001). Plus la vitesse est grande, moins l'action des bras et de la jambe d'appel sont importantes (Dapena, 2002), mais une trop grande vitesse induira des risques de blessure.

La phase d'appel commence lorsque le pied d'appel – le dernier pied touchant le sol avant le franchissement de la barre – se pose, jusqu'à ce qu'il quitte le sol (Dapena, 1996). Elle peut être divisée en deux parties : la phase d'amortissement, quand l'appui est à l'avant par rapport au centre de gravité et que ce dernier est bas, et la phase de poussée, où le centre de gravité se trouve à l'avant de l'appui et qu'il atteint son apogée (Laffaye, 2001). A ce moment-là, la vitesse verticale emmagasinée durant la phase d'élan doit être conservée au maximum, afin que le centre de gravité soit le plus haut possible lors de la phase de franchissement de la

barre (Dapena, 1996). Selon McMahon et Cheng (1990), l'impulsion idéale lors de la phase d'appel se fait grâce à un temps de contact au sol court. Dimitriev (1986) rajoute qu'une flexion légère du genou – 140 degrés au début de la phase d'appel et 160 degré à la fin – serait optimale. Dans une étude regroupant treize sauteurs de niveau international, Isolehto, Virmavirta, Kyrolainen, et Komi (2007) se sont également intéressés à l'importance de l'angulation lors de la phase d'appel, en digitalisant manuellement des marqueurs à différents endroits du corps: aux poignets, aux coudes, aux épaules, aux hanches, aux genoux, aux chevilles, aux orteils ainsi que des deux côtés du corps et de la tête. Leurs résultats sont en accord avec ceux de Dimitriev (1986) concernant l'angle optimal du genou. Il atteint en moyenne 168 degrés durant la phase d'appel (143 degrés au début de la phase d'appel et 173 degrés à la fin de la phase d'appel). Laffaye (2001) signale que l'angle du pied d'appel par rapport à la barre serait idéalement de 30 degrés alors que Tidow (1993) amène encore une précision en nous disant que le pied devrait se poser à environ un mètre de la barre. Il souligne aussi l'importance de la verticalité du corps lorsque le sauteur quitte le sol. Durant cette phase, les bras ont aussi un rôle important pour amener l'athlète vers un franchissement réussi. Un bon angle de l'articulation du coude se situerait entre 90 degrés et une extension complète (180 degrés) (Dapena et Ficklin, 2007) alors que Dapena (1979) estimait la flexion la plus efficace à 90 degrés. Lors de l'appel, une force est appliquée contre le sol et ensuite rendue par celui-ci. Plus le sauteur applique de force, plus le sol lui en rendra et il aura donc une plus grande vitesse verticale – importante pour un bon franchissement (Ecker, 1985). La difficulté de cette phase est d'optimiser la vitesse d'approche et la hauteur du centre de gravité. Une fois l'appel terminé et le sauteur en l'air, la trajectoire du centre de gravité ne peut plus être changée, seule la position des membres ou du tronc peut essayer de rattraper le saut, si ce dernier est mal engagé (Etourneau 1973 ; Peyloz 1976).

La dernière phase est la phase de franchissement de la barre. L'athlète doit tirer sa tête vers l'arrière afin de cambrer son dos, pour un franchissement plus facile. Cependant, certains athlètes ne le font pas et les raisons peuvent être les suivantes : l'athlète n'est pas conscient qu'il ne cambre pas son dos, il n'est pas assez souple, il manque de coordination ou alors ses muscles abdominaux et ses muscles fléchisseurs des hanches sont trop faibles et s'il cambrerait, il n'arriverait pas à ramener ses jambes pour ensuite franchir la barre (Dapena et Ficklin, 2007). L'athlète (surtout le débutant), pourrait également avoir peur d'atterrir sur la barre ou même sur la tête (Schwender, 2012). Selon Ogbonnaya (s.d.) si le « fosbury flop » est effectué correctement, le centre de gravité devrait se trouver sous le corps, donc entre l'athlète et la

barre. Il a prouvé cela en posant des Diode Electro-Luminescente (DELs) sur des parties spécifiques du corps des athlètes et a analysé la biomécanique en calculant la hauteur de leur centre de gravité. Dans la conclusion de son article, il encourage l'utilisation de la vidéo, car elle permet d'observer chaque moment du saut dans les détails et améliore ainsi la capacité de l'entraîneur à voir les défauts. Dans cette phase de franchissement, le sauteur a généralement soit un bras « orienteur » se dirigeant vers le bout du tapis alors que le deuxième reste le long du corps ; soit les deux bras passifs, le long du corps (Laffaye, 2001). Schwender (2012) affirme que cette phase de franchissement n'est pas négligeable chez les débutants. S'ils ne savent pas comment passer une barre avec la méthode « fosbury-flop », ils n'arriveront jamais à sauter correctement, malgré un élan et un appel parfait. Dapena (1996) contraste cela et maintient qu'un franchissement raté vient d'une des deux premières phases (cela est applicable pour des personnes qui connaissent le mouvement de « fosbury-flop »). Le dernier point clé de cette phase est que l'athlète doit sauter et avoir le corps perpendiculaire à la barre (Dapena, 2002). Des études, comme celle de Bradamante, Michelini et Stefanel (2004) ont filmé des sauts en hauteur afin d'évaluer la biomécanique du mouvement et de comprendre l'importance de chacune des phases du saut. Ils ont montré que pour passer la barre de manière perpendiculaire, des rotations autour de l'axe longitudinal et transverses sont indispensables.

Finalement, le saut en hauteur est une discipline dans laquelle la physiologie de l'athlète joue un grand rôle et où la technique varie quelque peu selon les athlètes. Le saut dépend certes de la technique de l'athlète, mais également de la longueur de ses tendons, de sa masse de sa souplesse ou encore de ses fibres rapides lui permettant d'emmagasiner assez de vitesse (McMahon, Valiant, & Frederick, 1987). Pira et Levarlet (1978) affirment qu'un long tendon pourrait compenser un manque de vitesse, tout comme une personne petite pourrait compenser ce déficit par de hautes vitesses et beaucoup de dynamisme lors de son élan. Le saut dépend également du réflexe de contraction-étirement de l'athlète (Stretch-shortening cycle) (Komi & Gollhofer, 1997).

Le saut en hauteur est donc une discipline très technique qui demande beaucoup de travail et qui peut toujours être améliorée. Chaque facteur clé du saut dépend également de l'athlète ; l'entraîneur doit donc s'adapter à chacun et ne peut pas généraliser une seule technique (Dapena, 1996). Lorsqu'un saut est raté, les causes peuvent être multiples ; cela peut venir d'un pied d'appel trop près ou trop loin de la barre, d'une trop faible rotation ou cambrure, ou encore d'un mauvais timing lors de l'esquive, avec les jambes ramenées trop tôt ou trop tard

(Dapena, 1996). Le rôle de l'entraîneur est de trouver d'où provient la faute ; la chercher à l'aide d'une vidéo pourrait lui simplifier la tâche.

1.2 Les feedbacks

Le feedback « représente l'information concernant la différence entre l'état d'un objectif et la performance » (R. A. Schmidt & Debü, 1993). Les feedbacks sont des outils indispensables des entraîneurs et enseignants afin de faire progresser leurs athlètes et élèves en leur donnant des corrections. Souvent associés au sport, ils peuvent également être utilisés en milieu intellectuel, comme en sciences physiques. En effet, Thornton et Sokoloff (1990) ont prouvé qu'un apprentissage pratique – en se rendant directement compte de ses erreurs – pour comprendre les problèmes de vitesse en sciences physiques, amenait à de meilleurs résultats que lors d'un apprentissage purement théorique. Apprendre avec des jeux interactifs sur l'ordinateur motiverait aussi davantage les étudiants, permettrait un apprentissage plus efficace et aiderait à la mémorisation (Kafai, 2001). Nous pouvons donc supposer que l'utilisation d'un feedback vidéo ou d'un feedback vidéo virtuel interactif (FVVI), comme nous allons utiliser dans notre étude, améliorerait aussi la motivation des sujets. Le FVVI permet au sujet de regarder son mouvement en trois dimensions, sous forme de squelette. Il peut ainsi observer ses erreurs à posteriori et se concentrer sur différents aspects biomécaniques. La correction ainsi que la compréhension des erreurs serait alors mieux maîtrisée. Bandura (1977) rajoute que l'apprentissage par observation nécessite de l'attention et le fait de donner un feedback augmente et captive l'attention de l'élève ou de l'athlète. Il faut cependant faire attention à ne pas trop donner de feedbacks, car cela pourrait amener une dépendance à l'athlète, lui enlever sa motivation et diminuer ses performances, s'il n'en reçoit plus (R. A. Schmidt, Young, Swinnen, & Shapiro, 1989). Les feedbacks doivent aussi être donnés en fonction du niveau de l'élève ou de l'athlète. Un débutant devrait avoir des feedbacks plutôt généraux alors qu'un expert devrait recevoir des corrections plus détaillées (Hughes & Barlett, 2015).

Il existe différents feedbacks correspondant à différentes personnes. Certaines personnes sont des apprenants visuels, d'autres sont auditifs, d'autres préfèrent apprendre en lisant ou en écrivant et certains sont des apprentis kinesthésiques (Schiffer, 2014). Néanmoins, l'utilisation de la technologie (comme la vidéo) pourrait convenir à chaque type d'apprenant (Thompson, 2014). Adams, Gopher, et Lintern (1975) encouragent l'utilisation du feedback

en boucle fermée, avec une possible correction lors de l'apprentissage. Selon eux, le feedback visuel est ce qui a le plus d'effet.

Franzone et Collet-Klingenberg (2008) définissent l'utilisation du feedback vidéo de la manière suivante : « Video modelling is a mode of teaching that uses video recording and display equipment to provide a visual model of the targeted behaviour or skill ». En utilisant un feedback vidéo, en apportant les explications de l'entraîneur et en annotant le saut à l'aide d'applications, comme Dartfish, Sportec et Coaches'Eye, tous les apprenant peuvent en tirer du positif (Müller & Glad, 2014). Hunneshagen (2006) explique l'utilisation de l'application « Coaches'Eye », spécialisée dans le saut en hauteur, qui est une aide pour l'athlète, mais aussi pour l'entraîneur. Un modèle, défini comme optimal, est créé dans cette application, selon la littérature existante. Suite à ce modèle, des entraîneurs d'athlètes de haut niveau se sont concertés et se sont mis d'accord sur l'origine de certaines erreurs; pourquoi les athlètes n'arrivaient pas à effectuer le mouvement optimal, et les ont répertoriées dans l'application. Les entraîneurs et athlètes peuvent donc trouver dans l'application, la cause d'un mauvais franchissement de la barre. Ils peuvent aussi répondre à des questions concernant le saut en hauteur, afin de tester leurs capacités et peuvent trouver des exemple types d'entraînement. Cette application est à moindre frais et pourrait contribuer à l'amélioration des entraîneurs et des athlètes, ce qui n'est pas négligeable. Cela permet aussi à l'athlète de donner son avis en revoyant son mouvement, puisqu'il peut lui aussi l'analyser (Schiffer, 2014). Le feedback vidéo est donc, comme le prouve cette application, une grande aide pour s'améliorer. Cependant, l'entraîneur doit faire attention à toujours garder une bonne relation « coach-athlète » et ne pas laisser l'athlète seul avec ces nouvelles technologies (Hunneshagen, 2006). Hynes, O'Grady, et O'Hare (2013) considèrent qu'enregistrer les performances est un facteur clé de l'entraînement. Ils supportent l'utilité du feedback vidéo dans l'entraînement et soutiennent qu'il améliore non seulement les performances de l'athlète, mais également les capacités de l'entraîneur.

Clark et Nash (2015) et Schmidt et Lee (1999) soutiennent ces données mais nuancent que le feedback sera utile uniquement si la personne qui reçoit le feedback connaît le but à atteindre. Le feedback vidéo est important, mais nécessite également une bonne connaissance et doit être utilisé de manière appropriée. En effet, il est primordial de définir ce que l'on va observer avant de donner un feedback. Il peut aussi être utilisé en compétition pour corriger les mouvements lors de moments stressants ou lorsque l'athlète est sous pression – lors du saut en hauteur, si l'athlète a un troisième et dernier essai. Ces mouvements ne sont pas présents à

l'entraînement ; c'est pourquoi il est important de donner des feedbacks également en compétition. Cela permet ensuite de corriger les erreurs et peut-être de mieux réussir la compétition suivante (Wilson, 2008).

La vidéo peut être faite en deux ou trois dimensions, selon le sport. Un sport ou une discipline qui contient des rotations ou des translations – en dehors d'un plan unique, comme le plan sagittal – nécessitera trois dimensions. Une capture en trois dimensions permet également une meilleure analyse quantitative, au niveau de la biomécanique. Il faut donc utiliser trois caméras au minimum. Les images sont ensuite regroupées à l'aide d'un ordinateur, afin de n'en former plus qu'une (Wilson, 2008). Ce feedback en trois dimensions, avec une utilisation ou non de marqueurs sur le corps de l'athlète (comme nous l'avons fait lors de notre expérience) est particulièrement efficace pour des feedbacks donnés directement après l'exécution du mouvement, mais ne peut que très difficilement être utilisé lors de compétitions. Lorsque nous sommes dans un environnement en trois dimensions, l'entraîneur peut faire varier plusieurs paramètres, tel que la vitesse ou l'angle de vue de la vidéo. L'athlète se représentera donc facilement l'espace dans lequel il exécute le mouvement (Liebermann et al., 2002). Schmidt et Lee (1999) soulignent aussi l'importance d'une comparaison de la vidéo de l'athlète avec la vidéo de l'experte, qui peut-être fait avec le logiciel « Dartfish » par exemple. « Dartfish » a d'ailleurs créé « Simulcam technology » en 1997. Ce programme permet de comparer deux mouvements simultanément. Soit ceux de deux athlètes différents qui effectuent un même mouvement, au même endroit mais pas en même temps, soit deux mouvements du même athlète (Baca, 2008). L'athlète peut donc observer ses progrès de manière objective. Utiliser la comparaison est selon Schmidt et Lee (1999) la méthode la plus efficace, sachant que, depuis l'enfance, l'être humain imite ce qu'il observe (Meltzoff & Moore, 1977). Cette imitation se fait à l'aide des neurones miroirs, qui s'activent lorsque nous observons une activité que nous voudrions ensuite reproduire (Rizzolatti & Fabbri-Destro, 2010). Les améliorations par l'utilisation du feedback vidéo ont donc été prouvées. Cependant, une contradiction existe encore au niveau du modèle à utiliser. Zetou, Tzetzis, Vernadakis et Kioumourtzoglou (2002) et Barzouka, Bergeles et Hatziharistos (2007) ont montré que la modélisation de l'expert amenait les plus fortes améliorations alors que Baudry, Leroy et Chollet (2006) considéraient que la modélisation de soi était meilleure. Boyer, Miltenberger, Batsche, Fogel, et LeBlanc (2009) ainsi que Hazen, Johnstone, Martin et Srikameswaran (1990) ont eux prouvé que le plus efficace des feedbacks était une comparaison de soi et d'un expert. Ericsson, Krampe, et Tesch-Römer (1993) soutiennent qu'une évaluation personnelle

permet à l'individu de maintenir le mouvement ou de le corriger et qu'elle est essentielle dans le développement de ses capacités. La conclusion faite par Arabi et Sarabandi (2016) est finalement que la comparaison d'une modélisation vidéo de soi et de l'expert est la meilleure solution pour l'amélioration de la performance. Rothstein et Arnold (1976) ont remarqué que les personnes ayant plus d'expérience dans le domaine d'expérimentation obtenaient de meilleurs résultats grâce au feedback vidéo que les personnes novices. Finalement, l'utilisation de la vidéo est aussi importante, car elle peut être regardée à n'importe quel moment. Effectivement, certains feedback peuvent être directement amenés par l'athlète. S'il n'a pas réussi à tirer dans le but au foot ou s'il a fait tomber la barre lors du saut en hauteur – il saura qu'une erreur a été faite. Cependant, les informations plus spécifiques sont, la plupart du temps, amenées par l'entraîneur. Toutefois, ce dernier ne peut pas tout mémoriser. Il n'arrive pas à se souvenir de beaucoup d'éléments sur une longue durée. Franks et Miller (1991) ont étudié la capacité de mémorisation des entraîneurs lors d'un match de football. Il en ressort qu'ils mémorisent uniquement 30% des facteurs clés du match et se souviennent de moins de 45% lors du feedback après le match. La vidéo permet donc de se souvenir de plus d'informations et permet de mieux apprendre et comprendre, que lorsque l'on fait simplement de la pratique physique (Ashford, Bennett, & Davids, 2006).

Aggarwal et Cai (1997) ont reproduit le squelette humain. Ils se basaient sur une vidéo en deux dimensions et essayaient de reconstruire un nouveau squelette en trois dimensions avec les informations qu'ils récoltaient dans ces deux dimensions. Dans notre étude, grâce à l'application SkeletonPlayer¹, aux caméras infrarouges et aux marqueurs placés sur les sujets, nous avons pu directement obtenir une capture numérique du mouvement des sujets à travers un squelette en trois dimensions et nous avons donc gagné en précision. L'étude de Boyer et al. (2009) se rapproche de la notre et a été faite sur des gymnastes. Ils devaient effectuer un mouvement et recevaient ensuite la vidéo de leur passage en feedback, ou la vidéo d'un expert effectuant le même mouvement. Un groupe recevait aussi la vidéo de l'expert en simultané avec la sienne. Selon eux, tous les feedbacks amènent des améliorations, surtout à long terme. Ram, Riggs, Skaling, Landers et McCullagh (2007) ont également étudié la modélisation vidéo et l'ont comparée avec l'imagerie. Les participants devaient faire des squats et étaient ensuite évalués par plusieurs experts. Ceux qui recevaient la vidéo de l'expert en simultané à la leur avaient une amélioration significative par rapport à ceux qui avaient simplement reçu des informations orales, afin de pratiquer l'imagerie. Ces résultats montrent qu'il est beau-

¹ Application dédiée à l'analyse de mouvement développée par l'équipe Copelab (UniFribourg).

coup plus facile de se représenter le mouvement lorsque l'on voit un expert le faire, que lorsqu'il nous est demandé de l'imaginer. Cela peut être expliqué par le fait que l'athlète se rend compte que le mouvement est humainement possible et qu'il a les capacités de le réaliser (Dowrick, 1999).

1.3 Le feedback vidéo et le saut en hauteur

Notre étude avait pour but de comparer différents feedbacks vidéo, en deux et trois dimensions, afin d'améliorer la technique du saut en hauteur. D'autres études ont également utilisé la technologie pour analyser cette discipline de l'athlétisme. Wilson, King et Yeadon (2008) ont reproduit un sauteur dans un laboratoire, sur un ordinateur et ont pu calculer la vitesse et les angulations des articulations qui entraîneraient le plus haut saut. Une hyper extension du genou aurait donc, selon leurs résultats, permis d'atteindre des hauteurs approchant les trois mètres de haut (le record du monde se situe à 2m45). Certaines données seront utilisables pour l'amélioration du saut de l'humain, alors que d'autres découvertes, comme l'hyper extension du genou entraîneraient des blessures. Les ordinateurs et la technologie permettent de mieux comprendre certains mécanismes et d'améliorer les connaissances et capacités des athlètes et des entraîneurs. Frosio, Girlanda, Botton, Sibella, et Borghese (2007) ont eux étudié le saut en hauteur avec des caméras infrarouges 3D, comme nous l'avons fait. Ils ont également placé des marqueurs sur le corps de l'athlète. Ce dernier était ensuite divisé en 16 segments : Tête, mains, avant-bras, bras, haut et bas du tronc, abdomen, cuisses, jambes et pieds (cf. figure 1). Cette étude a été faite avec trois athlètes de niveau élite, afin de comparer leurs différentes techniques de saut. Ils n'ont pas du tout utilisé le feedback vidéo, au contraire de notre expérience, mais ont également cherché à comparer les différentes cinématiques des athlètes, afin de trouver quelles angulations ou quelle vitesse amènerait un saut idéal.



Figure 1. Disposition des marqueurs sur le sujet afin de reproduire un squelette en trois dimensions (Frosio et al., 2007, p.2).

1.4 Objectif du travail

L'objectif de ce travail est d'investiguer sur le thème du feedback en saut en hauteur en comparant un feedback vidéo en deux dimensions et un feedback vidéo virtuel interactif (FVVI). Ce dernier est proposé sous différentes formes : FVVI de l'expert ou FVVI de l'expert en simultané avec celui du sujet. Nous voulons donc observer l'amélioration d'un saut ou non, par rapport au saut de l'expert, selon le type de feedback et nous allons répondre à la question suivante :

- a) Un FVVI sujet + expert apporte-t-il significativement plus d'améliorations de la technique du saut en hauteur – par rapport à celle de l'expert – qu'un FVVI de l'expert ou qu'un feedback vidéo en deux dimensions?

Afin d'examiner scientifiquement cette question, nous avons formulé l'hypothèse suivante :

- H0 : Un FVVI sujet + expert n'apporte pas d'améliorations significatives de la technique de saut en hauteur, en comparaison avec un FVVI de l'expert ou une vidéo en deux dimensions.
- H1 : Un FVVI sujet + expert apporte des améliorations significatives de la technique de saut en hauteur, en comparaison avec un FVVI de l'expert ou une vidéo en deux dimensions.

2 Méthode

2.1 Echantillon

32 sujets et une experte de saut en hauteur ont été recrutés pour cette expérience. Les 32 sujets étaient 20 hommes et 12 femmes, ayant déjà pratiqué le saut en hauteur. L'experte était recrutée afin de servir de modèle aux 32 autres participants. Ils étaient soit étudiants en sport à l'université de Fribourg, soit des personnes pratiquant l'athlétisme et s'étant déjà essayé au saut en hauteur, sans pour autant que cela ne constitue leur discipline de prédilection. Les sujets étaient âgés de 23.4 ± 2.4 ans alors que l'experte était âgée de 21 ans.

2.2 Design de l'étude

Avant de commencer l'expérience, chaque sujet a reçu un formulaire de consentement qu'il a dûment rempli (cf. annexe 1). Une fois le formulaire signé, les participants découvraient l'endroit où ils allaient sauter et les explications leur étaient données. Ils allaient devoir partir à gauche ou à droite du tapis, selon leur pied d'appel. Ils choisissaient ensuite l'endroit depuis lequel ils souhaitaient prendre leur élan, sachant qu'ils n'auraient que trois pas d'élan. Les participants pouvaient, s'ils le souhaitaient, effectuer un saut d'essai, dans le but d'avoir les bonnes marques et de partir de l'endroit idéal pour effectuer leur saut. Tous les sujets devaient ensuite effectuer 24 sauts. 3 sauts pré-test, 9 x 2 sauts d'apprentissage et finalement 3 sauts post-test. Un feedback était donné après chaque bloc de saut (pré-test et apprentissage), ce qui constituait un total de 10 feedbacks. Les sujets avaient 1 minute pour regarder leur feedback et étaient répartis dans les quatre groupes suivants :

- Groupe 1 : Feedback vidéo (VID). Les sujets recevaient la vidéo en deux dimensions du saut de l'experte. Ils regardaient la vidéo dans les plans frontal et sagittal.
- Groupe 2 : Feedback vidéo virtuel interactif (FVVI) de l'experte (FVVlex). Les sujets recevaient la capture du mouvement de l'experte en trois dimensions. Ils regardaient la capture du mouvement dans les plans frontal et sagittal.
- Groupe 3 : FVVI de soi et de l'experte, simultanément (FVViplans). Les sujets recevaient la capture du mouvement de l'experte en trois dimensions à côté de leur capture du mouvement en trois dimensions. Les deux mouvements étaient alignés afin d'avoir la meilleure comparaison possible. Ils regardaient la superposition des deux mouvements dans les plans frontal et sagittal.
- Groupe 4 : FVVI de soi et de l'experte, simultanément (FVVilibre). Les sujets recevaient la capture du mouvement de l'experte en trois dimensions à côté de leur capture

du mouvement en trois dimensions. Les deux mouvements étaient alignés afin d'avoir la meilleure comparaison possible. Ils regardaient la superposition des deux mouvements dans tous les plans.

La répartition dans les quatre groupes s'est faite de manière aléatoire. Comme tous les sujets avaient déjà pratiqué le saut en hauteur mais que personne n'était expert, nous avons jugé leur niveau similaire. La distribution dans les groupes s'est faite selon le sex-ratio ; chaque groupe était constitué de 8 participants – 5 hommes et 3 femmes.

2.3 Description détaillée des méthodes et des instruments de recherche

L'étude a été effectuée dans le laboratoire de l'université de Fribourg. Son espace d'enregistrement vidéo est de 9.0m X 6.5m. Il est équipé d'un système de capture du mouvement (NaturalPoint Optitrack). 12 caméras infrarouges (Prime 17w) étaient placées sur des rails au plafond, afin de pouvoir les positionner dans les meilleurs angles, selon le mouvement à filmer. Elles étaient orientées par rapport au centre de la scène, défini par un objet en forme de « L » contenant des marqueurs et fournissant les différents axes (x,y,z), afin que les captures soient toutes orientées de la même manière. Les tapis de saut en hauteur étaient positionnés au fond du laboratoire, contre le mur. Les quatre tapis de seize formaient deux couches, en-dessous du tapis de quarante (Annexe 2). Les sujets pouvaient prendre leur élan en arc de cercle, depuis le fond du laboratoire, et atterrissaient ensuite sur les tapis. Leurs sauts comprenaient 3 pas d'élan, la phase d'appel ainsi que la phase de franchissement de la barre.

2.4 Interventions

Les sujets sont venus une seule fois dans le laboratoire afin de passer l'expérience. Elle durait entre 1 heure et 1 heure 15, selon le groupe dans lequel était attribué le sujet (FVVIplans et FVVIlivre nécessitaient plus de temps). L'experte a été filmée au stade de Saint-Leonard à Fribourg pour la vidéo en deux dimensions utilisée pour le groupe VID et est ensuite venue au laboratoire, où cinq sauts ont été enregistrés (cf. figure 2, PRE1) et son squelette a été construit (cf. figure 2, PRE2) Nous avons ensuite choisi le meilleur saut, afin de donner le meilleur feedback aux participants (cf. figure 2, PRE 3-4). Nous avons ensuite modifié le fichier, afin de faire une symétrie de la capture du mouvement de l'experte. Cette dernière sautant du pied droit, nous avons besoin de la symétrie de son saut avec le pied gauche. Cela permettait la superposition de sa capture et de celle des sujets sautant du pied gauche (cf. figure 2, PRE 5).

Le déroulement de l'expérience se faisait de la manière suivante : les sujets revêtaient une combinaison (pantalon et jaquette, chaussons, gants et bonnets) sur laquelle étaient ensuite fixés 41 capteurs. Ils se rendaient ensuite dans le laboratoire où le saut était enregistré (cf. figure 2, EXP 1) puis, le squelette reconstitué (cf. figure 2, EXP 2). L'expérimentateur s'occupait ensuite de donner le feedback correspondant au groupe du sujet. S'il se trouvait dans le groupe FVVlibre ou FVViplans, son enregistrement devait être découpé, afin de pouvoir ensuite le synchroniser avec celui de l'experte (cf. figure 2, EXP 3). Suite à cela, les deux squelettes (expert-sujet) étaient présentés simultanément. La fonction « align motion » de l'application Skeleton Player permettait de redimensionner le sujet, par rapport à l'expert (cf. figure 2, EXP 4-5). Finalement, le sujet avait 1 minute pour observer son feedback (cf. figure 2, EXP 6). Il pouvait déplacer le curseur sur l'écran et observer son feedback à la vitesse qu'il souhaitait.

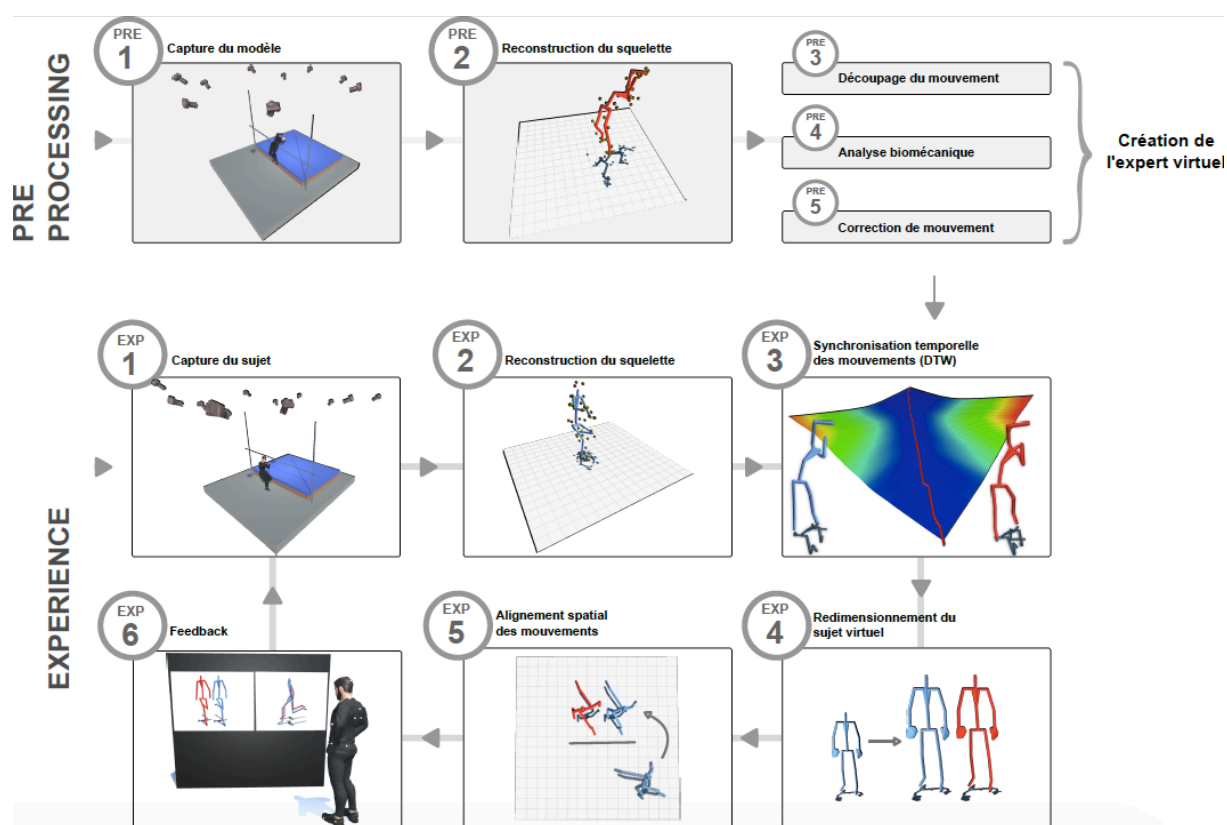


Figure 2. Interventions et déroulement de l'expérience de notre étude.

2.5 Evaluation et analyse statistique des données

Les analyses statistiques ont été faites en utilisant le logiciel R Studio, version 3.3.1. Pour toutes les analyses biomécaniques, nous avons calculé la différence entre les pré-tests et les post-tests, et comparé les différences obtenues pour les quatre types de feedback en utilisant

soit une Anova pour mesures indépendantes, soit un test de Kruskal-Wallis lorsque les données n'étaient pas paramétriques. Pour chaque type d'analyse, nous avons également testé si les différents types de feedback donnaient lieu à une amélioration significative (i.e., valeur plus faible en post-test qu'en pré-test). Pour les analyses des résultats de l'entraîneur national, nous avons calculé l'amélioration entre les pré- et post-tests de chaque groupe en utilisant un t.test lorsque les données étaient paramétriques et un test de Wilcoxon lorsque les données n'étaient pas paramétriques. Finalement, nous avons cherché la différence entre les groupes avec un test de Friedman.

3 Résultats

3.1 Résultats des analyses biomécaniques

Le premier test consistait à comparer l'experte et les sujets, au niveau spatial, donc observer les différences au niveau de la courbe d'élan ainsi que la différence de la distance du pied d'appel par rapport à la barre (cf. figure 3). FVVIlex n'a pas eu d'amélioration significative ($p < 0.05$; $p = 0.7422$) et VID non plus ($p = 0.1203$). FVVIlibre et FVVIplans se sont améliorés avec une moyenne post-test significativement plus petite que la moyenne pré-test (FVVIlibre : (différence = -46.36), $t(7) = -2.42$, $p = 0.046$ et FVVIplans : (différence = -42.68), $t(7) = -4.42$, $p = 0.003$). Par contre, aucune différence significative entre les quatre méthodes de feedback n'a été trouvée ($F(3,28) = 1.26$, $p = 0.31$).

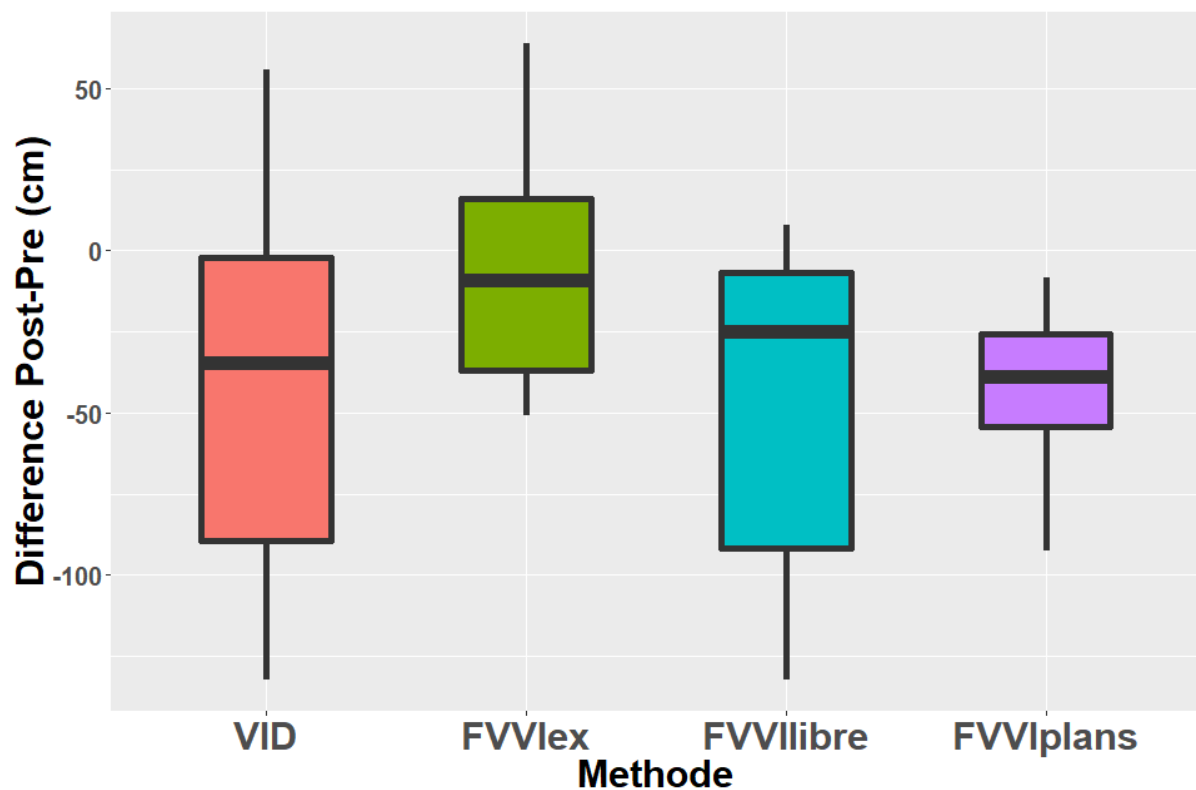


Figure 3. Analyse spatiale, différence entre les post-tests et les pré-tests. Amélioration significative pour FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe « plans ») et FVVIlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre) entre pré-test et post-test. Aucune amélioration significative pour les groupes VID (feedback vidéo) et FVVIlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert). Aucune différence significative entre les groupes.

La deuxième analyse a été faite pour observer la différence des sujets avec l'experte, au niveau temporel. Aucune amélioration significative entre le pré-test et le post-test n'a été trouvée, dans aucun des groupes. Aucune différence significative n'a été trouvée entre les quatre méthodes de feedback ($F(3,28) = 0.72$, $p = 0.55$) (cf. figure 4).

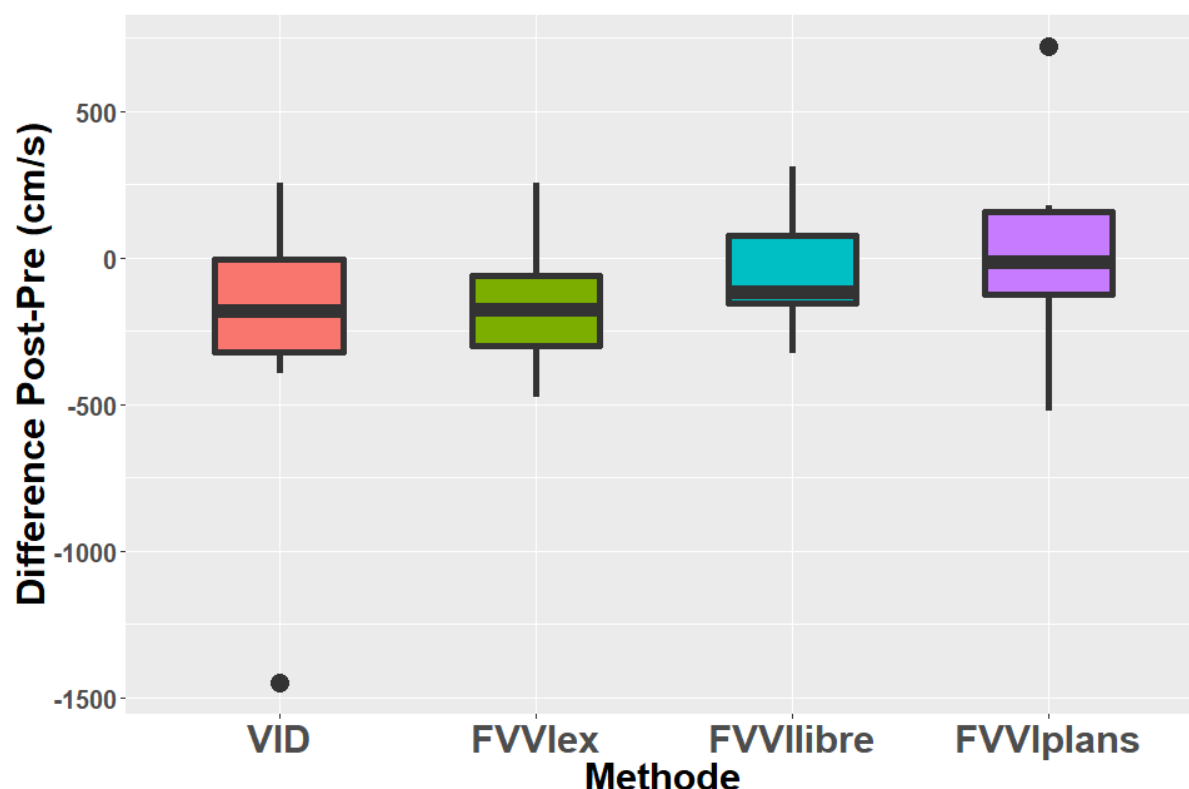


Figure 4. Analyse temporelle, différence entre les post-tests et les pré-tests. Aucune amélioration significative entre pré-test et post-test, dans aucun des groupes (VID (feedback vidéo), FVVIlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert), FVVIlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre), FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Aucune différence significative entre les groupes.

Les prochaines analyses biomécaniques concernent les différents angles importants pour une bonne technique du saut en hauteur. Le premier angle analysé est l'angle du coude lors de l'impulsion, afin d'observer si le sujet se sert de ses bras correctement. Pour l'analyse, nous avons fait la moyenne de l'angle des deux coudes. Il devrait se trouver entre 90 degrés et 180 degrés (Dapena et Fricklin, 2007), avec un angle optimal à 90 degrés (Dapena, 1979). Pour chaque groupe, un seul sujet ne se trouvait pas dans l'intervalle des valeurs idéales « 90-180 » degrés. Nous avons décidé de comparer les valeurs des sujets avec la valeur optimale de 90 degrés (Dapena, 1979). Pour ce point d'analyse, aucune différence significative entre les méthodes n'a été trouvée ($F(3,27) = 0.176$, $p = 0.92$). La différence entre les moyennes pré- et les moyennes post-test n'a montré aucune amélioration significative. Lors de cette analyse, tout comme l'analyse de l'angle du genou, le groupe FVVIlibre était composé de sept sujets au lieu de huit. Les données de la huitième personne n'ont pas pu être traitées (cf. figure 5).

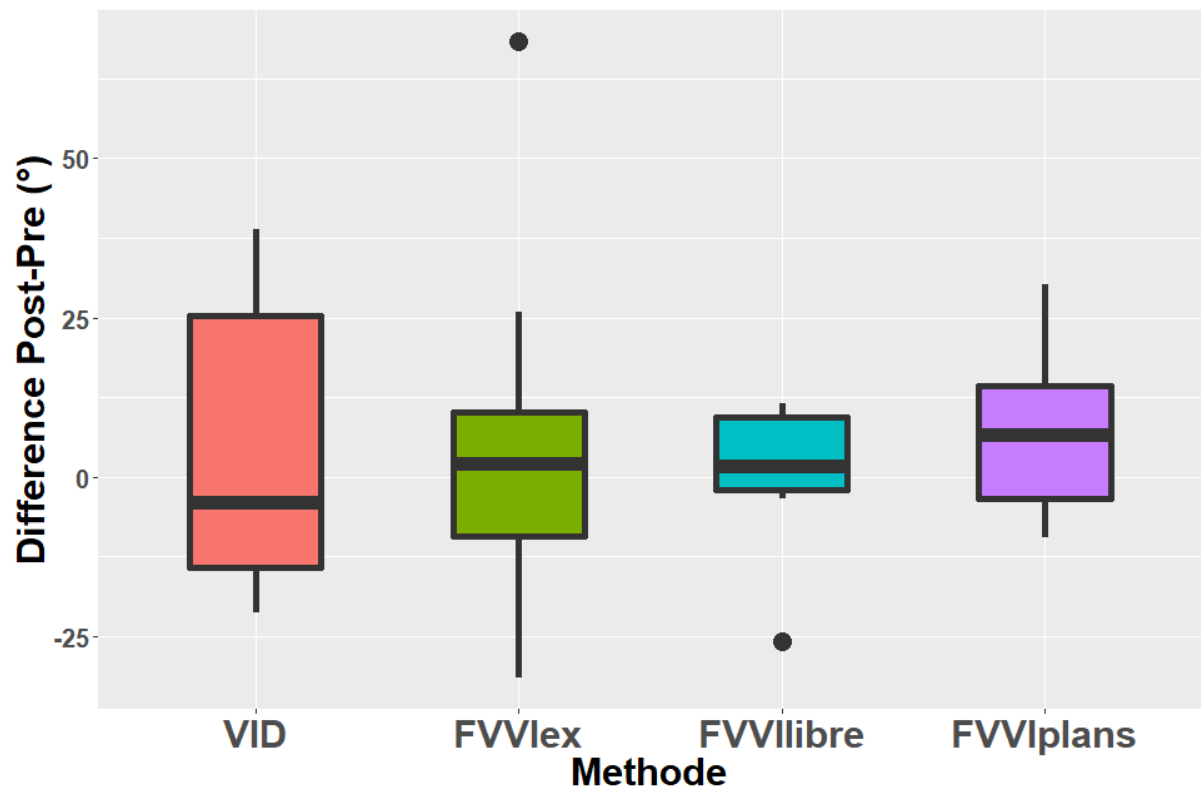


Figure 5. Analyse de l'angle des coudes, différence entre les post-tests et pré-tests. Aucune amélioration significative entre pré-test et post-test (VID (feedback vidéo), FVVlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert), FVVlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre), FVVlplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Aucune différence significative entre les groupes.

L'analyse de l'angle du genou n'a pas non plus donné lieu à des résultats significatifs entre les différentes méthodes. Pour observer l'amélioration entre pré- et post-test, nous avons analysés les résultats des sujets par rapport à une valeur optimale de 140 degrés au début de la phase d'appel (Dimitriev, 1986). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les groupes ($F(3,27) = 0.16$, $p = 0.92$). Aucune amélioration significative n'a été trouvée entre le pré- et post-test. Dans cette analyse, uniquement sept personnes se trouvaient dans le groupe FVVlibre. (cf. figure 6).

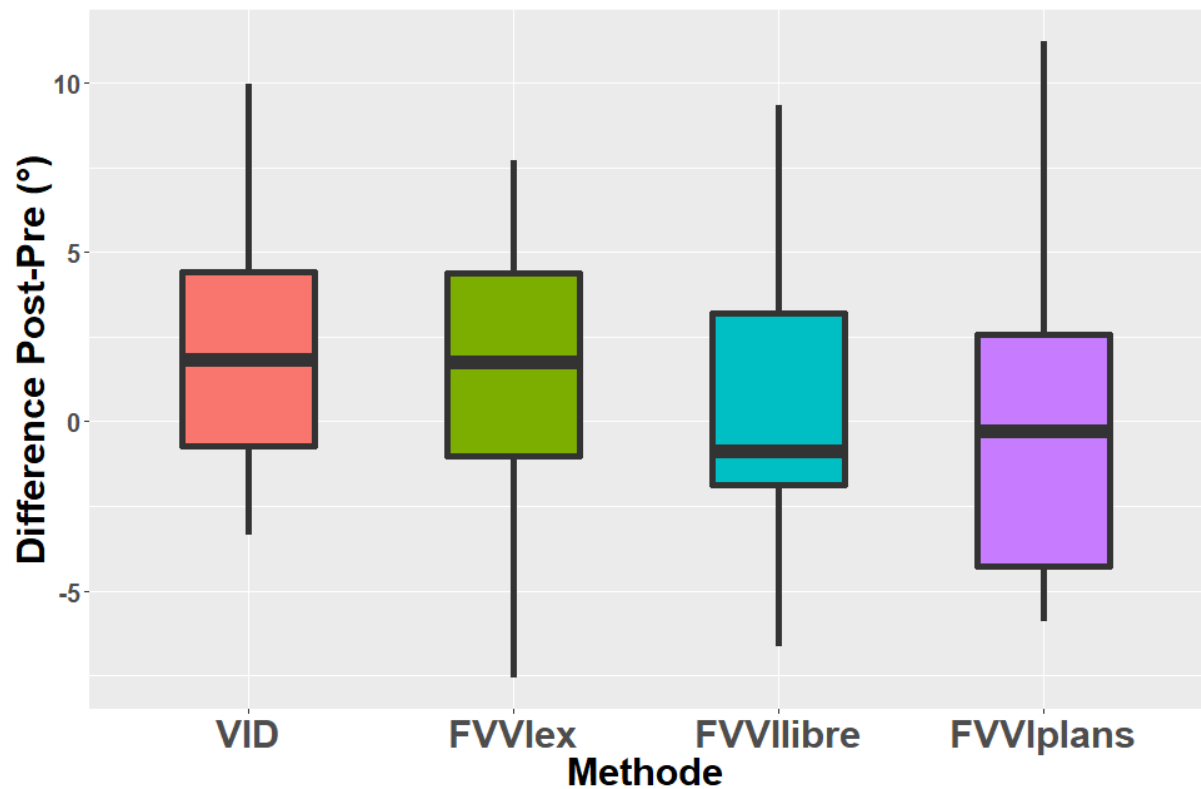


Figure 6. Analyse de l'angle du genou, différence entre les post-tests et pré-tests. Aucune amélioration significative entre pré- et post-test (VID (feedback vidéo), FVVlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert), FVVlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre), FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Aucune différence significative entre les groupes.

La comparaison de l'angle du pied d'appel a été faite par rapport à la valeur optimale se trouvant à 30 degrés (Laffaye, 2001). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les différentes méthodes ($F(3,28) = 0.99$, $p = 0.41$). Une régression significative a été trouvée pour le groupe FVVIplan avec $p = 0.02$ (différence = 22.86). Le groupe vidéo a lui obtenu une amélioration significative, avec $p = 0.008$ (différence = -10.48) (cf. figure 7).

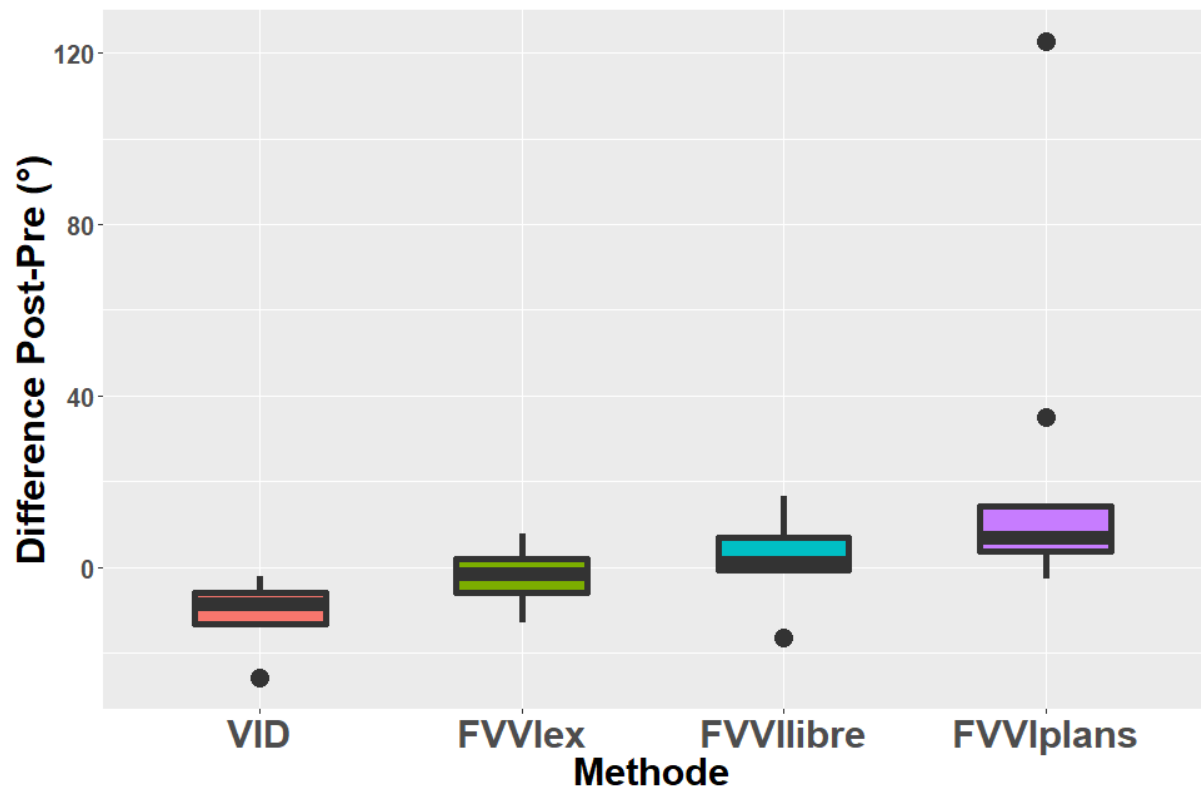


Figure 7. Analyse de l'angle du pied lors de l'appel, différence entre les post-tests et pré-tests. Amélioration significative entre pré-test et post-test pour le groupe VID (feedback vidéo) et régression significative pour FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Aucune amélioration significative pour FVVlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre) et FVVlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert). Aucune différence significative entre les groupes.

Notre dernière analyse biomécanique consistait à observer si le corps du sauteur était perpendiculaire à la barre lors du franchissement. Ces valeurs ont été trouvées en calculant l'angle du bassin par rapport à la barre. Un angle de zéro degré représentant la perpendiculaire parfaite. Nous trouvons sur ce point une différence significative entre les groupes ($F(3,27) = 4.11$, $p = 0.016$). Le groupe VID est significativement différent de FVVlibre ($p = 0.033$) et FVVIplan ($p = 0.033$). Aucun groupe n'obtient par contre d'amélioration entre le pré-test et le post-test (cf. figure 8).

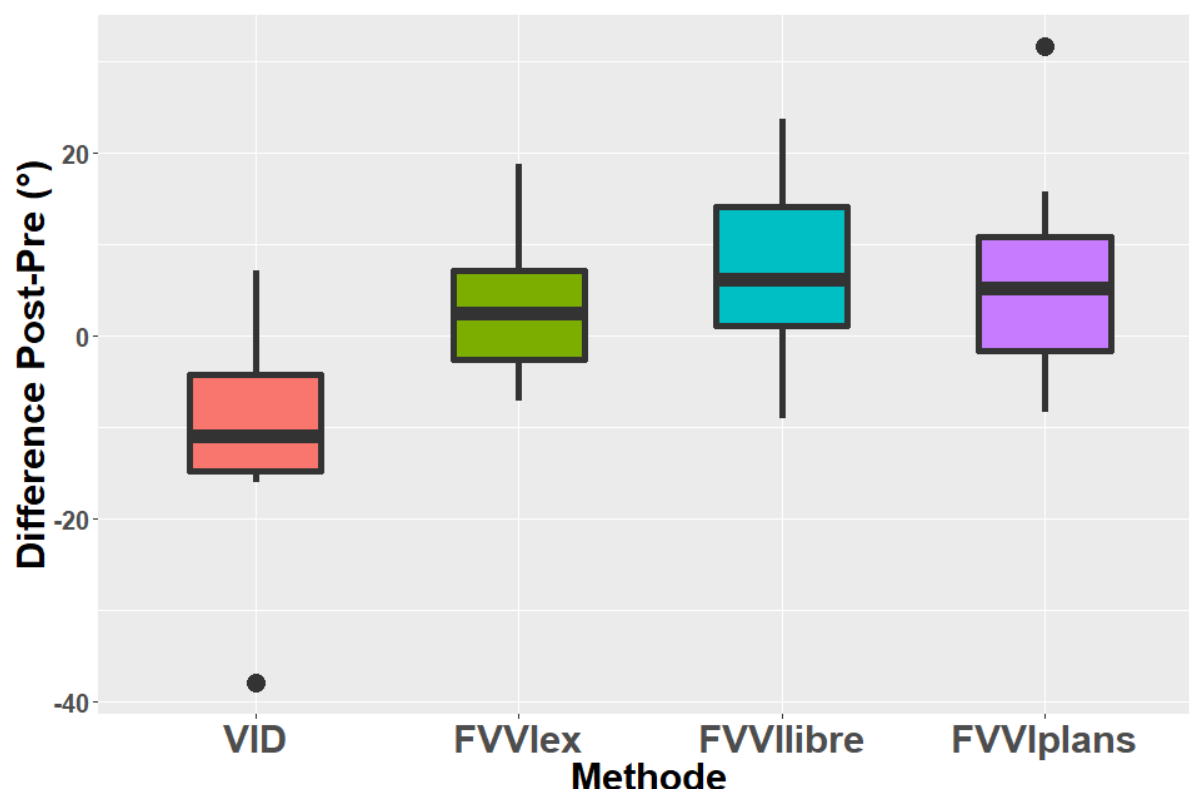


Figure 8. Angle du corps par rapport à la barre, différence entre les post-tests et les pré-tests. Aucune amélioration significative entre pré- et post-test (VID (feedback vidéo), FVVlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert), FVVlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre), FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Groupe VID significativement différent de FVVlibre et FVVIplans.

3.2 Résultats de l'analyse de l'entraîneur national

Nous avons demandé à l'entraîneur national de saut en hauteur de classer les différents sauts des différents groupes. Nous avons ensuite observé s'il y avait une amélioration entre les sauts post-tests et pré-tests de chaque groupe et s'il y avait une différence entre les groupes. Une amélioration significative ressort pour le groupe VID : (amélioration = 3.0), $p = 0.02$, ainsi que pour le groupe FVVlibre (amélioration = 2.19), $p = 0.008$. Les groupes FVVlex (amélioration = 1.56) et FVVIplan (amélioration = 1.25) n'obtiennent aucune amélioration significative ; nous relevons toutefois une amélioration. Aucune différence n'a été trouvée entre les différents groupes ($p = 0.23$) (cf. figure 9).

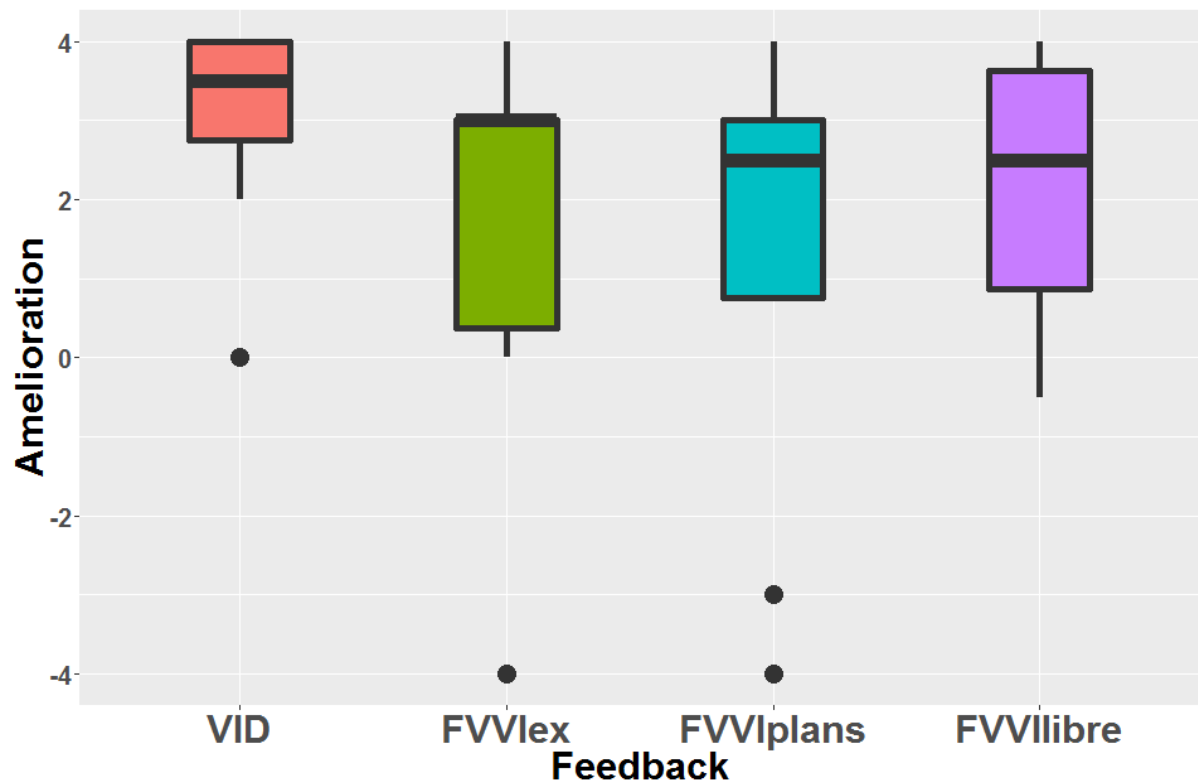


Figure 9. Amélioration aux post-tests par rapport aux pré-tests, selon les analyses de l'entraîneur national. Amélioration significative pour VID (feedback vidéo) et FVVlibre (feedback vidéo virtuel interactif, groupe libre), aucune amélioration significative pour les groupes FVVlex (feedback vidéo virtuel interactif, groupe expert) ni FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans). Aucune différence significative entre les groupes.

4 Discussion

C'est en nous basant sur le modèle de l'expert ainsi que sur les données récoltées dans la littérature, que nous avons analysé nos résultats. Sur l'ensemble des analyses (temporelle, spatiale, angle du genou, du pied, du coude et perpendicularité par rapport à la barre), seules deux ont montré une amélioration significative entre le pré-test et le post-test, dans certains groupes. Une analyse a indiqué une différence significative entre les groupes. Ce nombre réduit de résultats significatifs vient probablement du fait que les participants ne recevaient aucune consigne, excepté celle d'observer l'expert, avec ou sans son propre mouvement simultanément. Effectivement, Dickey (2003) a fait une étude sur des élèves devant apprendre la géométrie dans un environnement virtuel en trois dimensions. Les résultats montrent que lorsque les élèves peuvent s'entraider et lorsqu'ils reçoivent des informations par écrit (via la discussion instantanée), ils comprennent mieux et plus rapidement. Carroll et Bandura (1987) soutiennent ces affirmations et relèvent que l'apprentissage par observation est facilité lorsque les performances des sujets et de l'expert sont associées ou lorsque les points importants à observer sont accentués. Nous pouvons donc supposer que, si nous avions donné des indications sur les points clés à observer, par exemple en proposant de porter leur attention sur la trajectoire de la course d'élan, ou sur le pied d'appel, les sujets auraient eu de meilleurs résultats. Sheffield (1961) affirme que plus la représentation est proche du mouvement parfait, meilleur sera l'apprentissage. Il ajoute que les résultats sont meilleurs lorsque le modèle captive l'attention. Notre choix de l'experte a donc été judicieux, puisque nous l'avons présentée comme l'une des dix meilleures athlètes suisses de saut en hauteur, avec une technique de franchissement de barre excellente. Par rapport aux participants, son statut était supérieur et cela captive encore plus l'attention des sujets (Bandura, 1969 ; Landers & Landers, 1973).

L'analyse spatiale a montré des améliorations significatives entre les pré-tests et post-tests. Il s'agissait d'observer les différences entre les sujets et l'experte, au niveau de la gestuelle globale. Ces améliorations viennent des groupes FVVlibre et FVVIplans qui observaient la capture numérique de leur mouvement ainsi que celle de l'experte simultanément. Ces résultats sont cohérents, puisque les participants ont pu se repérer spatialement par rapport à l'experte et qu'ils ont pu observer les améliorations survenues au cours des différents feedbacks de la phase d'apprentissage. Se rapprocher de l'experte était relativement simple à effectuer car les différences étaient assez évidentes. Ces améliorations sont aussi dues à une analyse de mouvement globale, par rapport aux autres analyses plus spécifiques de notre étude. Les groupes VID et FVVIlex ne pouvaient pas comparer leurs mouvements à ceux de l'experte et

s'apercevaient moins aisément de leurs erreurs. Aucune amélioration significative n'a donc été trouvée. Cependant, ces deux groupes ont progressé spatialement, entre les pré-tests et post-tests.

L'analyse temporelle n'a révélé aucune amélioration significative. Cela peut s'expliquer par le fait que les sujets n'avaient plus assez d'énergie et d'explosivité lors de leurs 22, 23 et 24^{ème} sauts (post-tests). Effectivement, les entraînements techniques des sauteurs en hauteur comprennent dix à quinze sauts au maximum alors que notre étude en comportait 24. De plus, faire trop de sauts à élan réduit pourrait également engendrer un changement de dynamique du saut avec une phase d'appel plus longue, un centre de gravité plus bas et une vitesse réduite (Ritzdorf, 2009). Afin d'avoir des résultats plus proches de la réalité, il aurait fallu que l'experte fasse elle aussi 24 sauts, dans le but d'observer si sa dynamique changeait également ou si son expertise lui permettait de garder la même dynamique, durant l'ensemble de l'effort ou alors proposer un post test après une phase de rétention.

Les autres analyses consistaient à observer les angles importants pour le saut en hauteur. Nous avons commencé par regarder l'angle des coudes, au début de la phase d'appel. Aucune amélioration significative par rapport à la valeur idéale de 90 degrés (Dapena, 1979) n'a été trouvée. Tous les groupes ont même régressés entre les pré- et post-tests. Cependant, ces résultats doivent être nuancés. Si nous reprenons les résultats de Dapena et Ficklin (2007), les bras sont positionnés correctement à un angle entre 90 et 180 degrés. Seule une personne par groupe n'était pas située dans cet intervalle et nous pouvons donc conclure que la position des bras des sujets était correcte, bien qu'il n'y ait aucune amélioration par rapport à la valeur de 90 degrés.

L'analyse du genou n'a montré aucune amélioration significative et nous observons également une légère régression au sein de chaque groupe. Cela est probablement dû au fait que la représentation d'un angle idéal du genou n'est pas un point que les sujets regardaient attentivement. Lorsque l'on apprend le saut en hauteur, l'accent n'est pas particulièrement mis sur le genou, alors que dans la littérature, les analyses faites sur des sauteurs internationaux jugent l'angle du genou comme un facteur clé d'une bonne performance (Antekolovic, Blazevic, Meiovsek, & Coh, 2006 ; Laffaye, 2001). Silvan Keller – entraîneur national de saut en hauteur a comparé les sauts pré-tests et post-tests de nos sujets et affirme qu'il n'observe pas non plus le genou du sauteur pour juger le saut. Il se concentre principalement sur la dynamique et la vitesse d'action, desquelles découlera un angle du genou optimal. Effectivement, si le genou est trop plié, une vitesse élevée ne pourra pas être maintenue.

Les résultats de l'angle du pied par rapport à la barre sont significatifs pour le groupe VID alors que le groupe FVVIplans obtient des résultats significativement moins bons en post-test qu'en pré-tests. L'amélioration de l'angle du pied, pour le groupe VID provient sûrement du fait que la représentation du pied est plus facile lorsque l'on voit la vidéo, que lorsque l'on ne voit que le FVVI. De plus, visionner l'angle du pied du squelette par rapport au tapis n'était pas forcément idéal dans les plans frontal et sagittal (cf. figure 10). Les sujets du groupe VID pouvaient donc mieux se rendre compte de la pose du pied de l'experte. La régression significative du groupe FVVIplans est probablement due au fait que les sujets n'observaient pas forcément la différence avec l'experte au niveau du pied. Effectivement, lors du visionnage du feedback, beaucoup se concentraient sur la phase d'élan ainsi que sur le franchissement de la barre, mais aucun sujet n'a mentionné l'angle du pied.

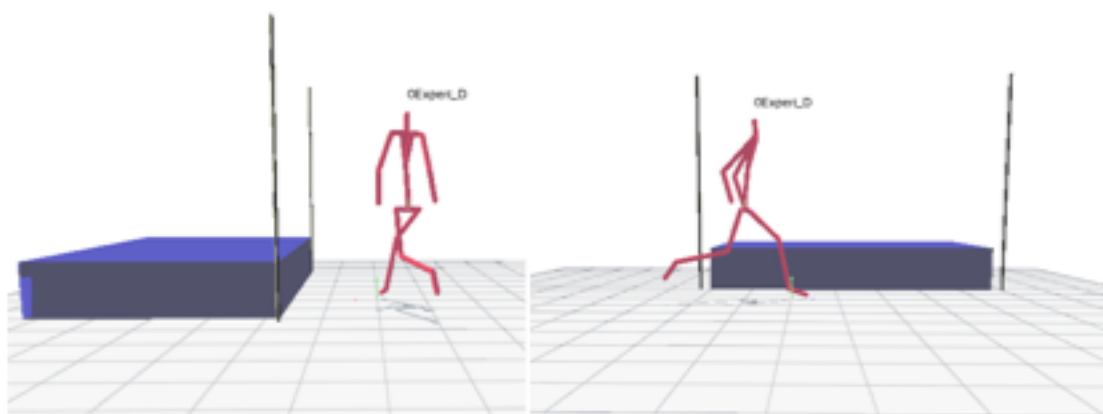


Figure 10. Angles de vue sagittal et frontal lors de l'appel pour le groupe FVVIplans (feedback vidéo virtuel interactif, groupe plans).

L'analyse du franchissement de la barre a révélé une amélioration (non-significative) pour le groupe VID, alors que les autres groupes ont régressé (non-significatif). En revanche, une différence significative a été trouvée entre les groupes. Le groupe VID est significativement différent du groupe FVVIplans et FVVIlibre. Ces résultats vont à l'encontre de notre hypothèse, qui supposait que la meilleure méthode de feedback viendrait du groupe FVVIplans ou FVVIlibre. Nous avons pensé que les groupes observant le mouvement de l'expert simultanément au leur seraient meilleurs. Notre hypothèse était supportée par l'étude d'Oñate et al. (2005) qui démontre que combiner l'expert et le sujet – pour l'apprentissage par observation – est mieux que simplement observer l'expert. Bien que nos résultats s'opposent à notre hypothèse, ils peuvent être nuancés en nous basant sur l'étude de Shea, Wright, Wulf et Whitacre

(2000). Ils ont cherché à savoir si une pratique combinée à l'observation amènerait de meilleurs résultats qu'une pratique simple. Leurs résultats démontrent que le groupe pratique-observation était meilleur uniquement lors du test de rétention, 24 heures après la phase d'apprentissage. Le manque d'amélioration significative dans notre étude pourrait donc provenir du post-test réalisé directement après la phase d'apprentissage. Nous supposons qu'un test de rétention, 24 heures après le post-test, aurait amené plus d'améliorations. Nous pouvons aussi noter que la différence entre les groupes vient uniquement de ce test et nous ne pouvons pas juger ce feedback vidéo comme le meilleur, uniquement sur la base de ces résultats.

Les analyses de l'entraîneur national révèlent une amélioration significative dans les groupes VID et FVVilibre, alors que les groupes FVVIex et FVVIplans se sont eux aussi améliorés, mais non-significativement. Ces résultats montrent que les feedbacks ont eu une influence positive sur les sujets et ont conduit à une amélioration. Certaines analyses biomécaniques ont montré des régressions chez les groupes, ce qui n'est pas le cas du point de vue de l'entraîneur. Nous pouvons donc avancer qu'une amélioration de la technique du saut en hauteur n'est pas forcément visible de manière biomécanique chez les novices, mais que l'ensemble des sauts post-tests peut être jugé comme meilleur que les sauts pré-tests. A nouveau, les groupes VID et FVVilibre ont une amélioration significative.

4.1 Un feedback meilleur que les autres ?

Lors des différentes analyses, trois groupes ont eu des améliorations significatives. Seul le groupe FVVIex n'en a jamais eue. Les sujets de ce groupe ne voyaient jamais leur mouvement et n'arrivaient pas forcément à analyser leurs fautes en regardant la capture numérique de l'expert sous forme de squelette, puisque ce dernier était un mouvement en trois dimensions et qu'ils n'étaient pas accoutumés à cette méthode. Effectivement, Rüdisühli (2002) démontre qu'une personne n'ayant pas l'habitude de recevoir un feedback vidéo se concentrerait plus sur l'image qu'elle a à l'écran plutôt que sur les erreurs qu'elle doit corriger. Nous supposons que ses affirmations peuvent également valoir pour un FVVI, ce qui expliquerait que ce groupe n'ait eu aucune amélioration significative. Les groupes FVVilibre, FVVIplans et VID ont eu des améliorations significatives. Nous pouvons justifier les résultats des groupes FVVIplans et libre avec la connaissance du résultat (CR). Adams (1986) affirme qu'une personne ayant reçu des informations concernant son résultat (donc une CR) s'améliorerait. Nous estimons que voir son squelette à côté de celui de l'expert donne une CR,

c'est pourquoi ces deux groupes se sont améliorés. Lorsqu'aucune CR n'est donnée, il est important que le modèle à recopier ait un niveau expert, afin de pouvoir se corriger à partir d'un mouvement correct. Le groupe VID a aussi eu des améliorations significatives ; cela est certainement dû au fait que les sujets avaient un feedback auquel ils étaient habitués. Effectivement, lorsque nous recevons un feedback « technologique » en cours de sport, ce dernier est sous forme de vidéo.

En nous basant sur l'ensemble des résultats, nous pouvons donc juger FVVIlibre et VID comme les deux meilleurs feedback, avec une préférence pour FVVIlibre. Cela confirme donc une partie de notre hypothèse. Le fait de pouvoir observer son mouvement depuis l'angle de vue souhaité a permis aux sujets d'avoir une meilleure analyse de leur mouvement par rapport à celui de l'expert. FVVIplans reste en retrait par rapport au groupe VID – feedback auquel les sujets étaient habitués – probablement car les deux plans n'offraient pas une vision assez détaillée du saut. Nous noterons également que le feedback vidéo reste beaucoup plus accessible qu'un FVVI. Effectivement, ce dernier nécessite une installation spécifique (caméras infrarouges, combinaisons, application SkeletonPlayer) et très coûteuse ; sa mise en place demande également beaucoup de temps. Ce feedback pouvant être utilisé uniquement en laboratoire, cela restreint la place disponible pour effectuer un mouvement. Le feedback vidéo reste donc le plus accessible et le plus conseillé, surtout pour des élèves ou des athlètes de niveau novice.

Finalement, la motivation des participants a aussi joué un rôle dans les résultats. Effectivement, plus les sujets sont attentifs, meilleurs seront leurs résultats (Bandura, 1977). Le groupe VID et le groupe FVVIlex ne trouvaient pas leur feedback passionnant et n'étaient pas autant motivés que les deux autres groupes ; nous pouvions observer une diminution de la motivation au fil des essais. FVVIplans et FVVIlibre étaient beaucoup plus motivés puisqu'ils pouvaient observer leur mouvement simultanément à celui de l'expert. Le manque de résultat significatif pour FVVIlex provient donc peut-être de ce manque de motivation.

4.2 Améliorations pour de futures recherches

Shea, Wright, Wulf et Whitcare (2000) ont observé qu'un entraînement réunissant pratique et observation amènerait de meilleurs résultats, mais que l'observation unique par rapport à la pratique, apporterait presque d'autant bons résultats, lors du test de rétention. Il serait donc intéressant d'observer si un feedback FVVI permet une amélioration uniquement lorsqu'il est lié à la pratique, ou s'il est également possible de s'améliorer sans pratiquer, rien qu'en observant. Cela pourrait être utile pour des mouvements compliqués, comme le saut en hauteur,

car une vidéo en trois dimensions permet de mieux comprendre le mouvement lorsqu'il est composé de translations ou de rotations (Wilson, 2008). Cela permettrait au sujet de continuer à s'améliorer, malgré les blessures. Il serait aussi intéressant d'observer si un test de rétention, 24 heures après le post-test, apporterait plus d'améliorations. Effectivement, cela permettrait aux sujets d'avoir récupéré de la phase d'apprentissage comprenant beaucoup de sauts. Ce nombre élevé de répétitions est important pour des tâches complexes avec plusieurs composantes – spatiales ou temporelle – car plus il y a d'observations, meilleurs sont les résultats (Carroll & Bandura, 1990). Rose et Christina (1997) et Magill (1993) affirment que lorsque le sujet reçoit un feedback vidéo, il nécessite ensuite au moins cinq semaines pour que le feedback soit efficace et que de réelles améliorations soient visibles. Le peu de temps que nous avons pour notre étude ne nous a pas permis de faire cela, mais il serait intéressant de comparer nos différents feedbacks sur le long terme. Finalement, il serait attrayant de combiner les feedbacks avec différentes indications, concernant l'angulation optimale par exemple, afin de guider les sujets dans leur observation et de leur permettre d'utiliser l'entier potentiel du feedback.

5 Conclusion

Suite aux résultats de notre étude, nous pouvons avancer qu'améliorer la technique du saut en hauteur en utilisant un FVVI ou un feedback vidéo est recommandé. Si l'entraîneur veut améliorer le saut de son athlète d'un point de vue spatial, utiliser un FVVIplans ou FVVIlibre est idéal. L'athlète peut se représenter dans l'espace par rapport à un expert et pourra ainsi recopier ses déplacements.

Améliorer les angles importants pour un bon saut en hauteur est par contre plus compliqué ; utiliser uniquement un FVVI ou un feedback vidéo ne permet pas à l'athlète de progresser. Il est indispensable de donner d'autres indications, afin de guider l'athlète dans son observation et lui permettre de regarder le moment du saut qui lui sera avantageux.

La dynamique du saut est un point important pour l'évaluation du mouvement – comme nous l'a confirmé Silvan Keller. Cependant, notre étude ne nous a pas permis d'observer des améliorations sur ce point, puisque la fatigue était trop présente chez les sujets. Un test de rétention nous aurait permis de savoir, si un FVVI ou un feedback vidéo aurait amené une progression.

Sur la base de nos données, nous concluons donc que le feedback le plus approprié pour un mouvement techniquement compliqué, comme le saut en hauteur, serait un FVVIlibre. Ce dernier permet d'observer son mouvement en trois dimensions, depuis l'angle souhaité. Cela a permis aux sujets de se concentrer sur les détails qui leur semblaient importants et qui n'étaient pas forcément visibles depuis les plans sagittal et frontal. Le feedback vidéo est également un bon feedback, selon nos résultats. L'utiliser dans le cadre de l'école reste donc très conseillé. La vidéo est d'ailleurs un feedback beaucoup plus accessible et un FVVI n'est pas forcément nécessaire pour des personnes de niveau novice.

Bibliographie

- Adams, J. A. (1986). Use of the model's knowledge of results to increase the observer's performance. *Journal of Human Movement Studies*, 12(2), 89-98.
- Adams, J. A., Gopher, D., & Lintern, G. (1975). *The effects of visual and proprioceptive feedback on motor learning*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting.
- Aggarwal, J. K., & Cai, Q. (1997). *Human motion analysis: A review*. Paper presented at the Nonrigid and Articulated Motion Workshop, 1997. Proceedings., IEEE.
- Antekolovic, L., Blazevic, I., Meiovsek, M., & Coh, M. (2006). Longitudinal follow-up of kinematic parameters in high jump-A case study. *New studies in athletics*, 21(4), 27.
- Arbabi, A., & Sarabandi, M. Effect of performance feedback with three different video modeling methods on acquisition and retention of badminton long service. *self*, 3(4), 5.
- Ashford, D., Bennett, S. J., & Davids, K. (2006). Observational modeling effects for movement dynamics and movement outcome measures across differing task constraints: a meta-analysis. *Journal of motor behavior*, 38(3), 185-205.
- Baca, A. (2008). Feedback systems. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 32.
- Bandura, A. (1969). Principles of behavior modification.
- Bandura, A. (1977). Social learning theory Englewood Cliffs: NJ: Prentice-Hall.
- Barzouka, K., Bergeles, N., & Hatziharistos, D. (2007). Effect of simultaneous model observation and self-modeling of volleyball skill acquisition. *Perceptual and motor skills*, 104(1), 32-42.
- Baudry, L., Leroy, D., & Chollet, D. (2006). The effect of combined self-and expert-modelling on the performance of the double leg circle on the pommel horse. *J Sports Sci*, 24(10), 1055-1063.
- Blažević, I., Antekolović, L., & Mejovšek, M. (2006). Variability of high jump kinematic parameters in longitudinal follow-up. *Kineziologija*, 38(1), 63-71.
- Boyer, E., Miltenberger, R. G., Batsche, C., Fogel, V., & LeBlanc, L. (2009). Video modeling by experts with video feedback to enhance gymnastics skills. *Journal of applied behavior analysis*, 42(4), 855-860.

- Bradamante, F., Michelini, M., & Stefanel, A. (2004). *The modelling in the sport for physics's learning: Fosbury-Flop and Judo's cases*. Paper presented at the Proceedings Girep Conference 2004.
- Carroll, W. R., & Bandura, A. (1987). Translating cognition into action: The role of visual guidance in observational learning. *Journal of motor behavior*, 19(3), 385-398.
- Carroll, W. R., & Bandura, A. (1990). Representational guidance of action production in observational learning: A causal analysis. *Journal of motor behavior*, 22(1), 85-97.
- Clark, J., & Nash, C. (2015). Technology in sports coaching. In C. Nash (Ed.), *Practical sports coaching* (pp. 259-276). London and New York: Routledge.
- Dapena, J. (1979). Mechanics of translation in the Fosbury-flop. *Medicine and science in sports and exercise*, 12(1), 37-44.
- Dapena, J. (1996). *A biomechanical scientific support program for high jumpers*. Paper presented at the 14th Symposium on Biomechanics in Sports, Madeira, Portugal.
- Dapena, J. (2002). *The evolution of high jumping technique: biomechanical analysis*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.
- Dapena, J., & Ficklin, T. K. (2007). High Jump #32 (Men). *Biomechanics Laboratory, Dept. of Kinesiology, Indiana University*, 1-133.
- Dickey, M. D. (2003). Teaching in 3D: Pedagogical affordances and constraints of 3D virtual worlds for synchronous distance learning. *Distance education*, 24(1), 105-121.
- Dimitriev, V. (1986). The Fosbury flop: basic structure of the take off. *Soviet Sports Rev*, 21(4), 167-171.
- Dowrick, P. W. (1999). A review of self modeling and related interventions. *Applied and preventive psychology*, 8(1), 23-39.
- Ecker, T. (1985). *Basic track & field biomechanics*: Tafnews.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), 363.
- Etourneau. (1973). Le Fosbury flop: essai pour une étude du système. *A.E.F.A*, 39.
- Farley, C. T., & Gonzalez, O. (1996). Leg stiffness and stride frequency in human running. *Journal of biomechanics*, 29(2), 181-186.
- Franks, I. M., & Miller, G. (1991). Training coaches to observe and remember. *J Sports Sci*, 9(3), 285-297.
- Franzone, E., & Collet-Klingenberg, L. (2008). Overview of video modeling. *Madison, WI: The National Professional Development Center on Autism Spectrum Disorders, Waisman Center. University of Wisconsin*, 1-2.

- Frosio, I., Girlanda, M., Botton, C., Sibella, F., & Borghese, A. (2007). *QUANTITATIVE ANALYSIS OF HIGH JUMP STYLES*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.
- Hazen, A., Johnstone, C., Martin, G. L., & Srikameswaran, S. (1990). A videotaping feedback package for improving skills of youth competitive swimmers. *The Sport Psychologist*, 4(3), 213-227.
- Hughes, M., & Barlett, R. (2015). What is performance analysis? In M. Hughes & I. M. Franks (Eds.), *Essentials of performance analysis in sport* (2 ed., pp. 18-28). London and New York: Routledge.
- Hunneshagen, C. (2006). Special Topic-Jumps-" Coaches Eye"--Technical analysis and fault finding as an internet application for coaching high jump. *New studies in athletics*, 21(4), 39.
- Hynes, G., O'Grady, M., & O'Hare, G. (2013). Towards accessible technologies for coaching. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 8(1), 105-114.
- Isolehto, J., Virmavirta, M., Kyrolainen, H., & Komi, P. (2007). Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New studies in athletics*, 22(2), 17.
- Kafai, Y. B. (2001). The educational potential of electronic games: From games-to-teach to games-to-learn. *Playing by the Rules, Cultural Policy Center, University of Chicago*.
- Komi, P. V., & Gollhofer, A. (1997). Stretch reflexes can have an important role in force enhancement during SSC exercise. *Journal of applied biomechanics*, 13(4), 451-460.
- Laffaye, G. (2001). Le saut en hauteur en Fosbury. *Science et motricité*(42), 3-15.
- Landers, D. M., & Landers, D. M. (1973). Teacher versus peer models: Effects of model's presence and performance level on motor behavior. *Journal of motor behavior*, 5(3), 129-139.
- Liebermann, D. G., Katz, L., Hughes, M. D., Bartlett, R. M., McClements, J., & Franks, I. M. (2002). Advances in the application of information technology to sport performance. *J Sports Sci*, 20(10), 755-769.
- Magill, R. A. (1993). *Motor learning: concepts and applications* (Vol. 4th ed). Dubuque, IA: Brown.
- McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *Journal of biomechanics*, 23, 65-78.
- McMahon, T. A., Valiant, G., & Frederick, E. C. (1987). Groucho running. *Journal of Applied Physiology*, 62(6), 2326-2337.

- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198(4312), 75-78.
- Müller, H., & Glad, B. (2014). Technology in Athletics. *New studies in athletics*, 3, 7-13.
- Ogbonnaya, U. C. (s.d.). High Jump! How does he do it? *Department of physics and Astronomy Minnesota State University Moorhead (MSUM)*.
- Oñate, J. A., Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Giuliani, C., Yu, B., & Garrett, W. E. (2005). Instruction of jump-landing technique using videotape feedback. *The American journal of sports medicine*, 33(6), 831-842.
- Peyloz, H. (1976). Les Sauts. *Editions Amphora*, 7-9, 173-177, 200-224, 232-271.
- Pira, A., & Levarlet, J. (1978). Etude comparative du flop-vitesse et du flop-amplitude. *Sport Belgique*, 21(1), 2-11.
- Ram, N., Riggs, S., Skaling, S., Landers, D., & McCullagh, P. (2007). A comparison of modelling and imagery in the acquisition and retention of motor skills. *J Sports Sci*, 25(5), 587-597.
- Ritzdorf, W. (2009). Approaches to technique and technical training in the high jump. *New studies in athletics*, 24(3), 31.
- Rizzolatti, G., & Fabbri-Destro, M. (2010). Mirror neurons: from discovery to autism. *Experimental brain research*, 200(3-4), 223-237.
- Rose, D. J., & Christina, R. W. (1997). A multilevel approach to the study of motor control and learning.
- 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.
- Schiffer, J. (2014). Sports Technology. *New studies in athletics*, 3, 99-130.
- Schmidt, R., & Lee, T. (1999). Motor control and learning . Champaign, IL: Human Kinetics. orientations. I. Activity of individual cells in motor cortex. *J Neurophysiol*, 77, 826-852.
- Schmidt, R. A., & Debü, B. (1993). Apprentissage moteur et performance. (Paris: Vigot), 254.
- Schmidt, R. A., Young, D. E., Swinnen, S., & Shapiro, D. C. (1989). Summary knowledge of results for skill acquisition: support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(2), 352.
- Schwender, U. (2012). Der Weg zum Flop. *Lehrhilfen für den Sportunterricht*, 61(2), 13-14.

- Shea, C. H., Wright, D. L., Wulf, G., & Whitacre, C. (2000). Physical and observational practice afford unique learning opportunities. *Journal of motor behavior*, 32(1), 27-36.
- Sheffield, F. D. (1961). Theoretical considerations in the learning of complex sequential tasks from demonstration and practice. *Student response in programmed instruction*, 13-32.
- Thompson, I. (2014). The rise of 'iPad' coaches. *Modern athlete and coach*, 52(3), 8-10.
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1990). Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools. *American journal of Physics*, 58(9), 858-867.
- Tidow, G. (1993). Model technique analysis-Part VIII The Flop High Jump. *New studies in athletics*, 8, 31-31.
- Wilson, B. D. (2008). Development in video technology for coaching. *Sports Technology*, 1(1), 34-40.
- Wilson, C., King, M. A., & Yeadon, M. R. (2008). *Optimisation of performance in running jumps for height*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.
- Zetou, E., Tzetzis, G., Vernadakis, N., & Kioumourtzoglou, E. (2002). Modeling in learning two volleyball skills. *Perceptual and motor skills*, 94(3_suppl), 1131-1142.

Annexes

Un feedback vidéo ou un feedback à l'aide de la « capture motion » permet-il d'améliorer la technique du franchissement de la barre en saut en hauteur ?

Déroulement du test :

Le/la participant(e) effectuera au total 24 sauts en hauteur, en se focalisant sur la technique de franchissement de la barre. L'élan sera raccourci et ne comptera que 3 appuis.

Les 24 sauts se dérouleront de la manière suivante :

- Pré test : 3 sauts
- Phase d'apprentissage : 9x2 sauts. Chaque bloc est suivi d'un certain feedback, selon le groupe auquel est assigné le/la participant/e
- Post-test : 3 sauts

Les participant(e)s sont réparti(e)s de manière homogène dans les 4 différents groupes :

- Feedback vidéo de l'expert
- Feedback du squelette de l'expert (capture motion)
- Feedback du squelette de l'expert, à côté du squelette du/de la participant(e), dans le plan frontal et sagittal (capture motion)
- Feedback du squelette de l'expert, à côté du squelette du/de la participant(e), dans n'importe quel plan (capture motion)

Toutes les données récoltées lors du test seront traitées de manière anonyme.

Si un(e) participant(e) souhaite se retirer de l'étude ou ne souhaite pas terminer sa session de test, pour une certaine raison, il pourra le faire.

Nous déclinons toutes responsabilités en cas d'accident ou de blessure.

La participation à l'étude n'est pas rémunérée.

Consentement du participant :

Nom : _____

Prénom : _____

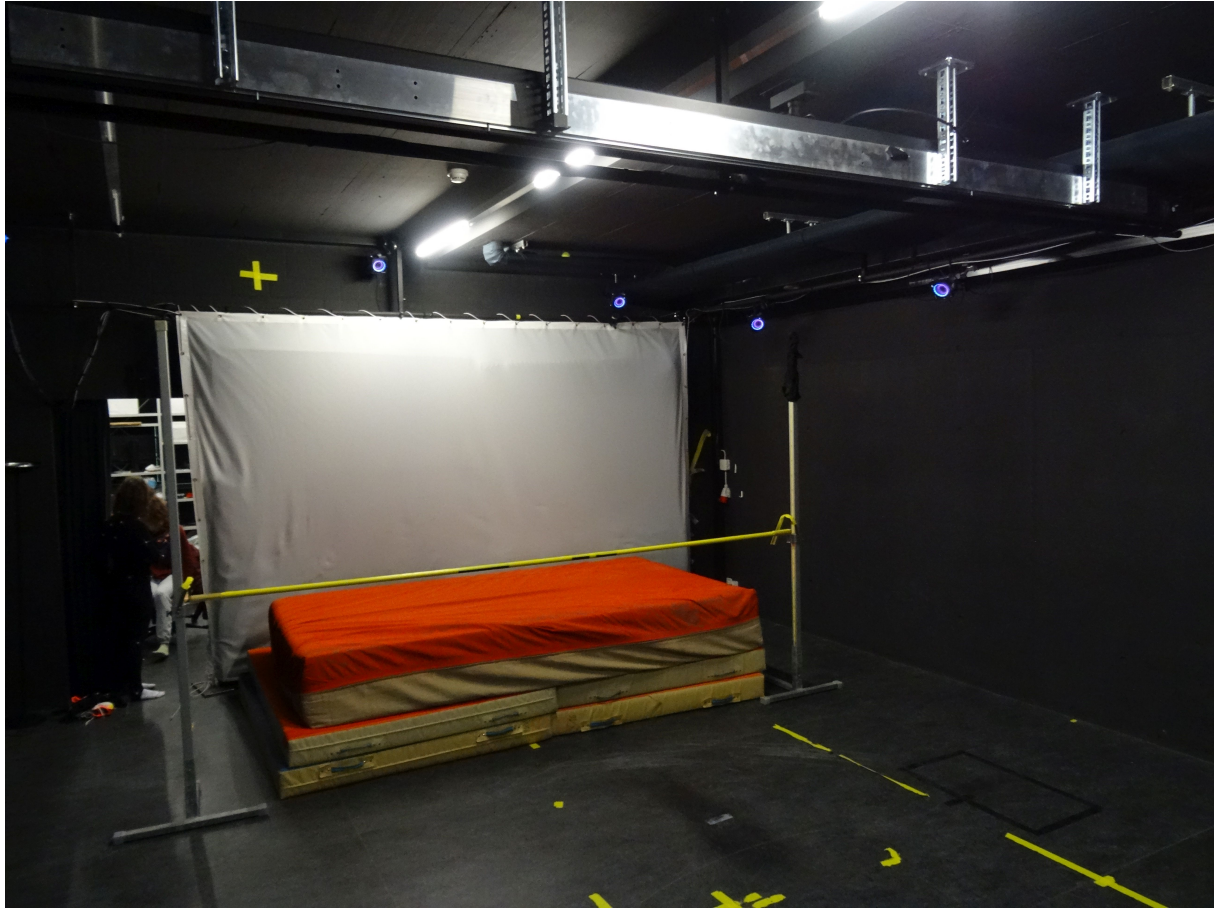
Date de naissance : _____

Je (participant(e) de l'étude) confirme avoir lu et compris le déroulement du test et accepte d'y participer.

Signature du participant : _____

Signature du « testeur » : _____

Annexe 1. Formulaire de consentement, rempli avant le début de l'expérience.



Annexe 2. Disposition des tapis.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux superviseurs, Professeur Jean-Pierre Bresciani ainsi que monsieur Thibaut Le Naour, pour m'avoir épaulé durant l'écriture de ce travail. J'ai apprécié leur suivi lors de mon travail et leurs disponibilités, lorsque j'avais des questions.

Ensuite, je tiens à remercier monsieur Silvan Keller, entraîneur national de saut et hauteur, pour avoir pris le temps de participer à mon étude et d'évaluer les sauts des différents sujets. Cela m'a permis d'avoir une analyse du point de vue d'un expert, permettant ensuite la comparaison avec l'analyse biomécanique.

Je tiens aussi à remercier monsieur Cédric Tamani, ainsi que les professeurs d'éducation physique et sportive du collège de Sainte-Croix, pour m'avoir prêté les tapis nécessaires au saut en hauteur, sans quoi mon travail n'aurait pas pu avoir lieu.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes qui sont venues participer à mon expérience, qui ont donné de leur temps et fait preuve de patience.