

Évaluation de l'efficacité d'un entraînement d'équilibre avec visualisation du centre de masse

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

Jessica Oertel

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 / Conseillère

Dr Amandine Dubois

Dr Thibaut LeNaour

Fribourg, juillet 2019

Table des matières

Résumé.....	3
1 Introduction.....	4
1.1 Équilibre.....	4
1.2 Entraînement d'équilibre avec feedback visuel	14
1.3 Objectif du travail	21
2 Méthode	22
2.1 Échantillon	22
2.2 Procédure expérimentale.....	22
2.3 Mesures	25
2.4 Analyse statistique des données.....	25
3 Résultats	27
4 Discussion	34
4.1 Différents types d'exercices évalués.....	34
4.2 Faiblesses de l'étude	36
5 Conclusion	39
Bibliographie.....	40
Remerciements.....	44

Résumé

L'équilibre postural représente la capacité à maintenir, à atteindre ou à rétablir un état d'équilibre pendant une posture ou une activité (Pollock, Durward, Rowe et Paul, 2000). C'est une capacité essentielle à notre motricité générale qui garde son importance tout au long de la vie. Le mécanisme derrière le contrôle de l'équilibre est d'une grande complexité et un nombre important de facteurs entre en jeu. En effet, la stabilité posturale dépend de facteurs biomécaniques, anthropométriques, neurophysiologiques, proprioceptifs, sensoriels ou encore cognitifs (Paillard, 2016). Vu l'importance de l'équilibre postural sur la qualité de vie, plusieurs études ont été réalisées à ce sujet. Parmi celles-ci, nombreuses sont celles qui démontrent l'efficacité d'un feedback visuel sur le maintien de l'équilibre. Le plus commun des feedbacks visuels étant celui des mouvements du centre de gravité ou du centre de pression.

Ce travail a donc pour but d'évaluer l'efficacité d'un entraînement d'équilibre chez des jeunes adultes ayant comme feedback visuel leur centre de masse représenté à l'intérieur d'une cible. L'idée est également de connaître quelle méthode d'entraînement permet un meilleur rendement quant au travail de l'équilibre.

Pour ce faire, nous avons eu 17 participants répartis en deux groupes : groupe contrôle ($n=8$) et groupe feedback ($n=9$). Chacun a participé à 6 entraînements d'équilibre, en fonction de la méthode qui lui a été attribuée, ainsi qu'aux pré et post tests, où quatre exercices d'équilibre statique ont été évalués.

Les résultats obtenus ne nous permettent finalement pas de confirmer l'efficacité de la visualisation des mouvements du centre de masse pour un entraînement d'équilibre. Nous avons pu observer une tendance vers l'amélioration principalement pour le groupe feedback, mais aucun résultat ne s'est avéré significatif. Ces résultats non concluants sont probablement dus à certaines faiblesses de l'étude, la principale étant un échantillon relativement petit.

1 Introduction

L'équilibre est une composante essentielle à notre capacité motrice générale. Bien qu'à l'apparence anodine, il y a pourtant une quantité innombrable de mouvements et de postures quotidiens qui en dépend. Même si tenir en station debout semble être d'une grande simplicité motrice, un important nombre de mécanismes entre en jeu pour maintenir l'équilibre postural. Tout ce mécanisme relatif à l'équilibre prend un certain temps pour se développer et se maîtriser chez l'être humain, mais fait partie des capacités motrices de base que l'on cherche à acquérir dès notre naissance. En effet, réussir à tenir debout et à marcher tout seul sont des objectifs primordiaux chez les enfants. Puis les années passent et tout ce mécanisme responsable du contrôle postural, acquis dès notre enfance et maîtrisé pendant de nombreuses années, commence à se détériorer avec la vieillesse jusqu'à devenir fragile, causant des instabilités posturales, voire des chutes. L'équilibre a donc toute son importance dès les premiers jours et jusqu'aux derniers. La qualité de notre vie en dépend d'une certaine manière et c'est pourquoi travailler et maîtriser cette capacité motrice a toute son importance.

1.1 Équilibre

L'équilibre postural représente la capacité à maintenir, à atteindre ou à rétablir un état d'équilibre pendant une posture ou une activité (Pollock, Durward, Rowe et Paul, 2000). L'équilibre est souvent divisé en deux catégories : l'équilibre statique et l'équilibre dynamique. L'équilibre statique consiste à rester en position stable et immobile. Maintenir en station debout est l'exemple le plus courant d'équilibre statique. L'équilibre dynamique consiste à maintenir une position stable tout en exécutant un mouvement. La marche est un exemple typique d'équilibre dynamique. Cependant, la corrélation entre ces deux types d'équilibre est floue (Karimi & Solomonidis, 2011).

La stabilité de l'équilibre dépend de nombreux facteurs. Elle dépend de facteurs biomécaniques, tels que les données anthropométriques des sujets (masse corporelle, hauteur du centre de gravité) ou le choix de la posture à adopter. Elle dépend également de la représentation du corps dans l'espace. Cette représentation interne s'acquiert par l'apprentissage, mais une part génétique en est également responsable. Elle dépend d'informations sensorielles visuelles, vestibulaires, musculo-tendineuses, articulaires et cutanées. Le maintien de l'équilibre dépend également de facteurs neurophysiologiques et cognitifs (Paillard, 2016).

Le terme de performance, lorsque l'on parle de maintien postural, fait référence à la capacité à minimiser les oscillations posturales dans des conditions posturales ordinaires ou, dans le cas

où les conditions posturales sont difficiles, à la capacité de résister à la chute. Les performances posturales évoluent positivement ou négativement en fonction de l'âge : lors du développement de l'enfant, le maintien postural s'améliore, en revanche, lors du vieillissement de l'adulte, celui-ci se détériore. Le statut physique de la personne, c'est-à-dire son activité ou inactivité, a également une influence sur sa performance posturale, tout comme son contexte environnemental (Paillard, 2016).

1.1.1 D'un point de vue biomécanique. La biomécanique joue un rôle central dans l'étude du contrôle postural. Une simple posture, telle que la station debout, révèle d'une certaine complexité et fait appel aux lois de la physique. Pour une approche biomécanique, il est cependant nécessaire de maîtriser certains termes spécifiques à ce langage (Noé, 2016).

Les notions de centre de masse (CM), de centre de gravité (CG) et de centre de pression (CP) sont fréquemment utilisées lorsque l'on parle d'équilibre et de contrôle postural. C'est pourquoi il est important de distinguer ces trois notions. Le CM représente le point théorique où la masse du corps est équitablement répartie. Lorsque le champ gravitationnel est uniforme, il se confond avec le CG, qui lui représente le point d'application de la résultante des forces gravitationnelles agissant sur un corps. Dans la littérature, il arrive que le CG se distingue du CM comme étant sa représentation verticale au sol (Winter, 1995).

Le CP, quant à lui, représente le point d'application de la résultante des forces verticales appliquées sur la surface d'appui. Comme on peut le voir sur la figure 1, en station debout, ce point diffère totalement de celui du CG (Noé, 2016).

Un alignement imparfait de ces deux forces entraîne une instabilité corporelle. En effet, lorsque ces deux centres ne sont plus alignés, le corps perd sa position d'équilibre favorisant ainsi une chute du corps. Si le CM se trouve en avant du CP, le corps subit une chute en avant et inversement, si le CM se trouve en arrière du CP, le corps subit une chute en arrière. L'équilibre corporel revient donc à la capacité à contrôler le CM à l'intérieur de la surface d'appui (Noé, 2016).

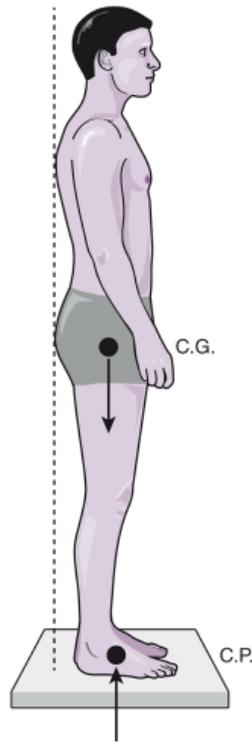


Figure 1. Représentation du CG et du CP corporels (Péninou & Colné, 2018)

Lorsque l'on parle d'équilibre et de surface d'appui, il est inévitable de mentionner la notion de base (ou polygone) de sustentation. Elle correspond à la surface sur laquelle la projection orthogonale du CG doit se trouver afin de garantir l'équilibre. Pour une posture bipodale, elle correspond à la surface de chaque pied ainsi qu'à la zone se trouvant entre ces deux derniers. Pour une posture monopodale, elle correspond à la surface sous le seul pied d'appui (Noé, 2016).

La notion d'équilibre, d'un point de vue biomécanique, fait appel à la première loi de Newton, qualifiant tout corps en équilibre lorsque la résultante des forces extérieures s'exerçant sur lui est nulle. Si le corps est en mouvement, sa vitesse vectorielle reste inchangée. L'équilibre se résume en deux conditions : premièrement, la somme des forces doit être égale à 0, autrement dit, il n'y a pas de mouvement de translation, deuxièmement, la somme des moments doit être égale à 0, signifiant qu'il n'y a aucun mouvement de rotation. Cependant, cette approche purement mécanique est à prendre avec précaution pour ce qui est de l'équilibre postural, étant donné qu'un corps humain debout subit constamment des micromouvements et ne peut donc pas être considéré comme un système en équilibre dans cette optique là (Noé, 2016).

Par conséquent, le maintien de la posture en station debout est exposé à toutes ces contraintes biomécaniques. La lutte contre la gravité est un paramètre essentiel au maintien postural et se

surmonte grâce au tonus musculaire stabilisant l'ensemble des articulations. Cette notion de maintien, contrôle ou stabilité posturale ne s'applique évidemment pas uniquement à la posture debout, mais à tout type de posture (Noé, 2016).

1.1.2 D'un point de vue neurophysiologique. La neurophysiologie joue elle aussi un rôle primordial dans l'analyse du contrôle postural. Par neurophysiologie, on entend tout ce qui concerne le contrôle moteur somatique. Par contrôle moteur somatique, on sous-entend entre autres le contrôle du tonus musculaire qui est responsable du maintien des différents segments corporels, de la posture statique et du contrôle des réactions motrices tonico-phasiques réalisant, quant à elles, les adaptations posturales nécessaires (Dupui, 2016).

En effet, la stabilité d'une posture debout nécessite une activité musculaire de base. Cette activité musculaire de base, ou autrement dit le tonus musculaire, est assurée grâce à plusieurs muscles squelettiques. Le système nerveux contrôle, en fonction des différents inputs environnementaux, cette activité musculaire tonique et réagit sur la déstabilisation corporelle de manière à ce que la projection du CG se trouve continuellement à l'intérieur du polygone de sustentation. L'effecteur concerné dans le maintien de l'équilibre et contrôlé par le système nerveux est donc le muscle strié squelettique, innervé par les motoneurones alpha, qui sont, avec les fibres musculaires, responsables de produire la force musculaire (Dupui, 2016).

Différents systèmes afférents amènent au système nerveux central les informations nécessaires au maintien de l'équilibre. Pour commencer, la vision transmet les repères visuels de verticalité grâce aux photorécepteurs de la rétine. Ces derniers captent les informations visuelles qui sont ensuite transmises par les voies optiques jusqu'au cortex cérébral occipital où elles sont finalement décryptées. Les propriocepteurs de l'appareil vestibulaire sont quant à eux sensibles aux accélérations linéaires et angulaires de la tête dans l'espace. Ils sont par conséquent d'une grande utilité pour l'orientation spatiale au regard du vecteur gravitationnel. Les récepteurs somesthésiques cutanés renseignent notamment sur la position de corps par rapport à la pesanteur. Lorsque le sujet est debout par exemple, la force de pesanteur agit et occasionne des sensations de pression et de contact sur les soles plantaires. Ces sensations sont interprétées par les récepteurs cutanés plantaires, les récepteurs de Pacini entre autres. Ceux-ci permettent également de sentir les irrégularités du sol et procèdent ainsi aux adaptations d'équilibration. Les propriocepteurs myoarticulaires jouent aussi un rôle important dans le contrôle du maintien postural et informent sur la position des différents segments corporels les uns par rapport aux autres. Ces récepteurs sont responsables des boucles réflexes, indispensables à la régulation du tonus musculaire. Les principaux récepteurs myoarticulaires sont

les fuseaux neuromusculaires, qui réagissent en fonction de l'allongement des muscles par réflexe myotatique (rôle primordial dans le maintien du tonus des muscles posturaux). Ce sont principalement les muscles anti-gravitaires, tenus de constamment lutter contre la gravité pour maintenir une station orthostatique stable, qui requièrent ce type de récepteurs. Les organes tendineux de Golgi, sensibles à la traction du tendon musculaire et responsables du réflexe myotatique inverse font partie eux aussi des récepteurs myoarticulaires primordiaux. D'autres récepteurs articulaires situés dans les capsules et les ligaments perçoivent la position, la vitesse, la direction et les accélérations des mouvements des articulations et aident au maintien postural (Dupui, 2016).

Ces diverses informations sensorielles sont intégrées à différents niveaux du système nerveux central, qui s'occupe de contrôler de manière hiérarchisée la contraction des muscles striés nécessaires. Grâce à leur activité tonique, ces derniers vont contribuer au maintien d'une posture lambda ainsi qu'à la stabilisation de la position des différents segments articulaires. Cette fonction des muscles est essentielle pour que les mouvements corporels soient réalisés correctement. Concrètement, ce tonus musculaire émane d'une contraction permanente du muscle en raison de son excitation par les motoneurones alpha (Dupui, 2016).

De nombreux muscles et articulations agissent en permanence et jouent un rôle crucial pour maintenir l'équilibre corporel. En station debout, le maintien de l'équilibre se fait principalement en contrôlant le tibialis anterior et le triceps surae, soit les muscles des chevilles. D'autres muscles posturaux entrent évidemment en jeu au niveau de la cheville pour le maintien de l'équilibre en station debout, par exemple les éverseurs et les inverseurs. Lorsque l'équilibre orthostatique est fortement perturbé, d'autres importantes articulations, telles que la hanche et le genou (ainsi que leurs muscles respectifs), sont impliquées. C'est en contrebalançant l'effet de la force de gravité que le maintien de l'alignement des différents segments du corps se fait (Paillard, 2016).

La station debout est une sorte parmi tant d'autres de postures statiques. Toute organisation spécifique des différents segments corporels correspond à une posture. Une infinité de postures est donc possible. Le maintien d'une posture étant une composante essentielle à la motricité humaine, la qualité de cette dernière est représentative d'une manière générale de la performance motrice (Paillard, 2016).

Le maintien postural, tout comme l'exécution de mouvements, se contrôle par conséquent par le système nerveux central, qui assure instantanément la correction et l'ajustement postural. Ce retour du système nerveux sur le maintien postural se base notamment sur les informations sensorielles reçues comme le montre la figure 2 (Dupui, 2016).

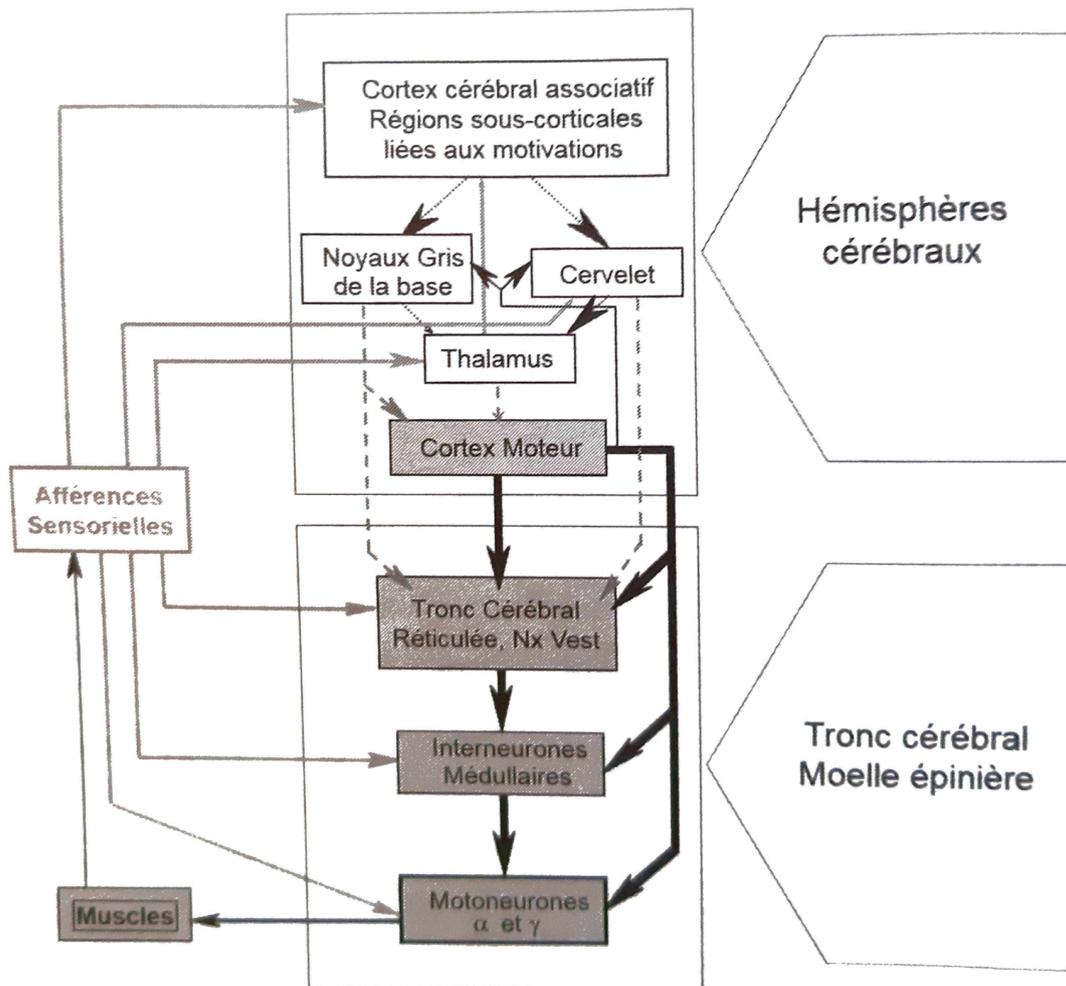


Figure 2. Différents systèmes sensori-moteurs impliqués dans le contrôle postural (Dupui, 2016)

1.1.3 D'un point de vue sensoriel. Le maintien de l'équilibre dépend donc de la coopération des différents systèmes sensoriels, responsables de déceler les positions et déplacements corporels, ainsi que des muscles effecteurs, responsables des réactions d'équilibration. Du point de vue sensoriel, les informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques entrent en jeu dans la stabilité posturale (Isableu & Vuillerme, 2016).

Vision. La vision amène des informations concernant les déplacements du sujet par rapport à son environnement. Grâce à ses qualités d'acuité visuelle, de sensibilité aux contrastes, de perception de la profondeur, de perception des objets et des mouvements dans l'environnement, elle contribue à l'équilibration posturale. Étant donné que tout mouvement a un impact sur le plan visuel, le système visuel peut être vu comme un détecteur des déséquilibres posturaux grâce à sa capacité à relever les différents positionnements du corps dans l'espace. La responsabilité du maintien de l'équilibre vient ensuite au système nerveux cen-

tral, qui doit interpréter correctement les informations visuelles transmises de sorte à enclencher l'activité musculaire adéquate pour maintenir le CM à l'intérieur du polygone de sustentation (Isableu & Vuillerme, 2016).

Il est connu depuis bien longtemps que la vision joue un rôle important au niveau de l'équilibre postural. En effet, les études ont montré qu'une entrée visuelle réduite engendrait une augmentation des oscillations posturales corporelles (Collins & DeLuca, 1995). D'autres études ont démontré que la suppression des informations visuelles provoquait une instabilité posturale (Nashner & Berthoz, 1978). L'information visuelle devient encore plus importante pour le maintien de l'équilibre lorsque la surface d'appui devient plus instable, avec une mousse par exemple (Hlavacka & Saling, 1986) ou alors lorsque la surface d'appui est latéralement réduite, comme en position tandem (Amblard, Cremieux, Marchand & Carblanc, 1985).

Système vestibulaire. Comme déjà cité précédemment, l'appareil vestibulaire affecte fortement l'équilibre postural. Ceci est dû au fait que ses connexions neurosensorielles vestibulaires périphériques sont rattachées aux noyaux vestibulaires, situés au niveau du tronc cérébral. Ces derniers rallient les connexions sensorielles en quatre directions : vers le système visuo-oculomoteur, vers le système proprioceptif, vers le cervelet et vers le cortex. Par conséquent, une atteinte au niveau de l'appareil vestibulaire peut se répercuter sur les voies vestibulo-spinales (qui assurent la stabilisation de la tête et de la posture et luttent contre la gravité, spécialement en station debout), ou autrement dit sur le système proprioceptif, et ainsi impacter la stabilité (Perrin & Vibert, 2016).

Proprioception. La proprioception correspond à la perception consciente ou inconsciente de la position des articulations, du mouvement, de la force, de la lourdeur et de l'effort (Röijezon, Clark & Treleaven, 2015). Elle dépend des propriocepteurs, présents dans les muscles et les tendons (les fuseaux neuromusculaires), dans les articulations (les organes tendineux de Golgi, les corpuscules de Ruffini, de Pacini et de Golgi-Mazzoni), dans les fascias (les corpuscules de Ruffini et de Pacini) et la peau (les corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Meissner et les disques de Merkel). Ceux-ci sont responsables de fournir les informations sensorielles relatives à l'état du corps dans l'espace au système nerveux central. Ils fournissent les informations concernant la longueur des muscles, la vitesse de variation de longueur du muscle, la tension musculaire, la tension et la compression lors du mouvement. Le corps dépend donc de ces nombreux feedbacks sensoriels, transmis grâce à ces propriocepteurs, pour maintenir l'équilibre postural. Cependant, la proprioception peut être affaiblie par plusieurs facteurs, tels que la fatigue, le vieillissement ou encore l'arthrite (Boyas, 2016).

Sensibilité cutanée plantaire. La sensibilité cutanée plantaire fait partie de ce que l'on appelle la somesthésie. La somesthésie est le système sensoriel caractérisant un ensemble de sensations telles que la pression, la chaleur, la douleur, etc. Elle fait donc elle aussi partie des informations sensorielles utiles au système nerveux afin de contrôler l'équilibre postural. La sole plantaire (partie inférieure du pied) est la zone du pied la plus concernée concernant la sensibilité plantaire. Néanmoins, la face dorsale du pied (partie supérieure du pied) a elle aussi une utilité. La sensibilité plantaire est assurée par les récepteurs sensitifs, notamment les mécanorécepteurs et les nocicepteurs, qui s'occupent de fournir les informations sensorielles plantaires (Janin, 2016). Ces afférences ont un rôle essentiel dans le système postural. Le pied influe par conséquent le contrôle de la fonction d'équilibration et peut agir instantanément sur la position du corps en gérant l'intensité de la force de la pression exercée sur le sol (Bessou & Bessou, 2003). Une stimulation au niveau de la sole plantaire induit une rétroaction sensorielle venant de la plante du pied. Ce feedback va permettre de déterminer le niveau d'activation musculaire nécessaire à cette réponse (Meyer, Oddsson & De Luca, 2004). Le niveau ainsi que la localisation de contact de la plante du pied avec le sol affectent la réponse posturale (Roll, Kavounoudias & Roll 2002). Toutes ces informations aident au maintien de l'équilibre idéal.

1.1.4 D'un point de vue anthropométrique. L'anthropométrie concerne toutes les caractéristiques morphologiques du corps humain, notamment sa taille, sa masse, sa circonférence, la position du CG, la longueur de ses segments, etc. Les contraintes anthropométriques ont une influence sur le mouvement et également sur le contrôle postural. Prenons comme exemple l'influence de la taille des pieds sur le maintien postural. Nous savons que la stabilité posturale dépend énormément de la base de sustentation et cette dernière dépend des caractéristiques anthropométriques des sujets. En effet, un sujet qui possède de grands pieds aura une plus grande base de sustentation. Par conséquent, la taille des pieds, qui est un facteur anthropométrique joue un rôle sur la stabilité posturale (Noé, 2016).

Dans ce chapitre, nous allons discuter des deux facteurs anthropométriques principaux ayant un effet sur le contrôle postural : la taille et la masse corporelle. Les individus peuvent être classés en fonction de leur corpulence en trois grands somatotypes : endomorphe, qui représente des corpulences grosses et lourdes avec une grande quantité de tissu adipeux, mésomorphe, qui représente des corpulences avec une ossature et une musculature imposantes, et ectomorphe, qui représente des corpulences fines, de grandes tailles et avec une musculature peu développée (Carter & Heath, 1990).

Effets de la taille. Plusieurs études ont montré une corrélation entre la taille et le contrôle postural. Celui-ci se dégraderait lorsque la taille des sujets augmenterait. À travers leur étude, Chiari et al. (2002) ont évalué le contrôle postural et pris en compte différentes données anthropométriques sur 50 sujets adultes sains. Les résultats ont montré que la taille des sujets était bel et bien un facteur important sur l'équilibre postural. En effet, les sujets de grande taille ont montré des oscillations posturales plus importantes que les sujets petits. Cette tendance corrélée à la taille des individus est liée aux facteurs biomécaniques. Ayant le CM placé plus haut, les sujets plus grands sont par conséquent plus instables (Noé, 2016).

C'est également une des explications concernant les différences d'équilibre entre sexes. Certaines études, notamment celle de Chiari et al. (2002) ont expliqué que les sujets féminins montraient des meilleures performances d'équilibre en comparaison avec les sujets masculins. Ces différences pourraient être, entre autres, liées à la différence de taille, les sujets masculins étant généralement plus grands. La taille est donc un facteur anthropométrique ayant un impact sur le contrôle postural (Noé, 2016).

Effets de la masse. Concernant l'effet de la masse corporelle sur le contrôle postural, plusieurs études ont également été conduites. Celles-ci ont montré un affaiblissement du contrôle postural associé à une augmentation de la masse corporelle. Il est évident qu'une surcharge pondérale engendre des contraintes biomécaniques ayant forcément un impact sur l'équilibre. Cependant, le lien entre masse corporelle et contrôle postural n'est pas si simple qu'elle paraît et de nombreux autres facteurs sont aussi à prendre en compte. Mais il est vrai que la majorité des études comparant des sujets « normaux » à des sujets obèses montrent un impact négatif de l'obésité sur le contrôle postural, et cela à tout âge. Les oscillations posturales sont plus prononcées chez les obèses (Noé, 2016). Ceci serait dû au fait que le surplus de masse corporelle perturberait l'information sensorielle provenant des mécanorécepteurs cutanés plantaires. Une masse corporelle trop importante augmenterait les valeurs de pressions plantaires ainsi que le niveau de stimulation mécanique des récepteurs. Ceci réduirait leur niveau de sensibilité et serait une des raisons pour lesquelles les sujets en surpoids montrent un contrôle postural de moins bonne qualité (Hue et al, 2007). Toutefois, bien que l'opposé, c'est-à-dire une faible masse corporelle, est perçu d'un premier abord et d'un point de vue purement mécanique comme un avantage en ce qui concerne le contrôle postural, la maigreur a elle aussi ses désavantages au niveau de la stabilité. Une masse corporelle réduite est souvent liée à une faiblesse musculaire et à des difficultés neuromusculaires, ce qui a un impact négatif sur le contrôle postural. La maigreur aurait donc elle aussi une influence négative sur la stabilité postu-

rale. Néanmoins, aujourd'hui cela reste encore une hypothèse, car peu d'études ont été réalisées à ce sujet (Noé, 2016).

1.1.5 Activité physique et maintien postural. Il est connu depuis bien longtemps que la pratique sportive a de nombreux bienfaits sur le corps humain. La notion d'équilibration n'échappe pas à cette règle, car l'activité physique permet de l'améliorer. Par conséquent, les sportifs montrent de meilleures habiletés posturales que des personnes sédentaires (Hrysomalis, 2011). Cependant, chaque activité sportive influence à sa manière le système d'équilibration, comme on peut le voir sur l'image ci-dessous (figure 3). Le niveau d'expertise des sujets joue un rôle également. Les informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives sont fortement sollicitées par la pratique sportive et ces informations sensorielles sont toutes impliquées dans les performances posturales, d'où l'importance de l'activité physique pour le maintien postural (Lion, Gokeler & Gauchard, 2016).

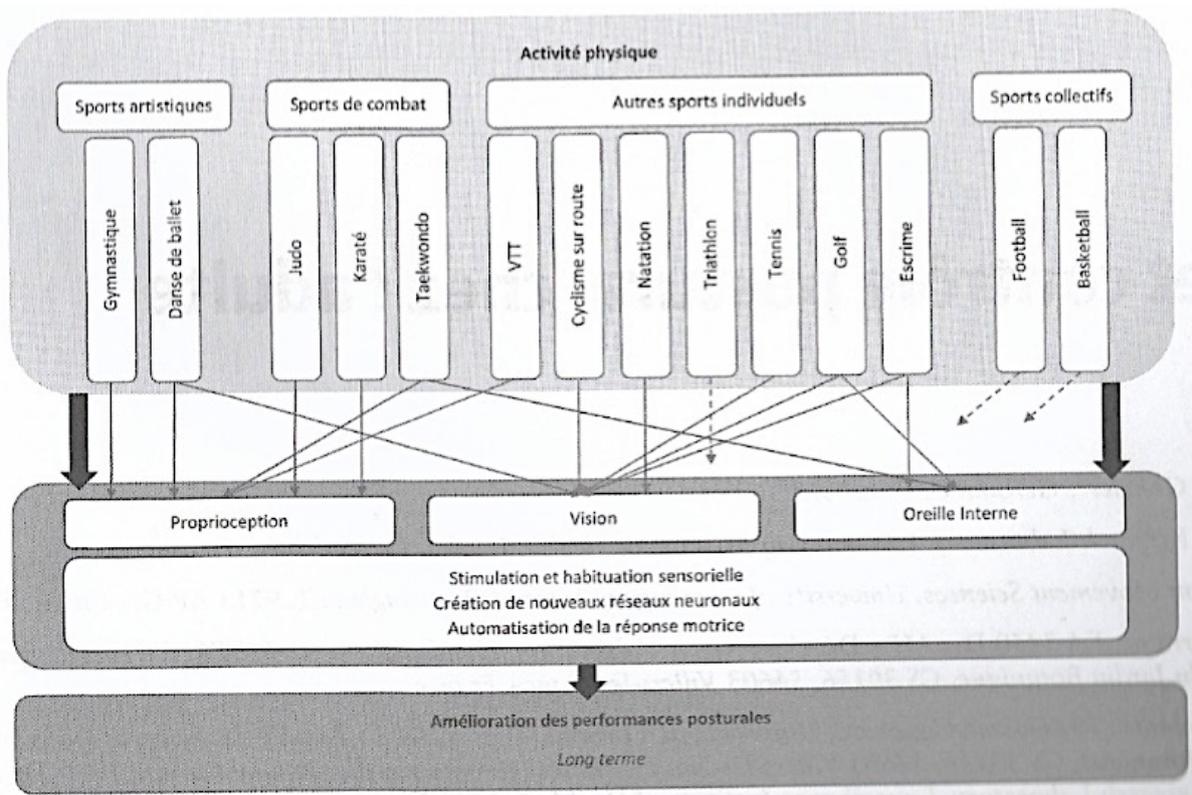


Figure 3. Effets à long terme des différents types de sport sur le contrôle postural (Lion et al., 2016).

Dans les sports artistiques, les instabilités sont perçues comme des erreurs. C'est pourquoi des sportifs comme des gymnastes doivent avoir un contrôle parfait de leurs mouvements et de leur équilibre. Leurs performances posturales peuvent s'expliquer grâce à leur excellente utili-

sation des informations proprioceptives, notamment celles provenant des chevilles (Aydin, Yildiz, Yildiz, Atesalp & Kalyon, 2002). Les amateurs d'arts martiaux et de sports de combat utilisent eux aussi efficacement les informations proprioceptives du fait de devoir être constamment prêts aux mouvements inattendus de l'adversaire. Les sports individuels sont quant à eux très différents les uns des autres et apportent tous des caractéristiques sensorielles utiles à l'équilibration corporelle. Les tireurs travaillent leur équilibre statique alors que les escrimeurs améliorent plutôt leur équilibre dynamique. Les sports balistiques, le cyclisme ou encore la natation développent principalement la vision pour s'équilibrer. En conclusion, la pratique sportive reste bénéfique sur l'équilibration humaine (Lion et al., 2016).

1.1.6 Effet de la fatigue musculaire sur l'équilibre. Une fatigue peut apparaître lors d'un effort physique ou suite à celui-ci et engendrer une diminution des différentes fonctions motrices. Le contrôle postural faisant partie des fonctions motrices, il peut être affaibli pendant ou après une activité physique. Qu'il soit de courte ou de longue durée, qu'il sollicite un grand nombre de groupes musculaires ou seulement quelques-uns, l'effort physique ayant causé une fatigue, induira dans tous les cas une perturbation de l'équilibre (Lion et al., 2016). La fatigue musculaire qui a pour conséquence une diminution de la force et de la vitesse de contraction musculaire expliquerait donc les perturbations des performances posturales suivant un effort physique. Elle entraverait la réponse motrice nécessaire pour maîtriser les perturbations d'équilibre (Ledin, Fransson & Magnusson, 2004).

1.2 Entraînement d'équilibre avec feedback visuel

La capacité à maintenir l'équilibre dans différentes postures statiques repose sur la capacité du système nerveux central à contrôler les mouvements ou les variations de positions. Pour ce faire, il doit réussir à maintenir le CM du corps à l'intérieur de la base de sustentation (Takeda et al., 2017). En station debout, le CM est régulé par les mouvements continus du CP. Ceux-ci sont contrôlés grâce à la rétroaction, à l'anticipation, à la contraction des muscles ou grâce à la combinaison de ces trois éléments (Cawsey, Chua, Carpenter & Sanderson, 2009). Plusieurs études ont prouvé que cette capacité était entraînable, c'est-à-dire que l'on pouvait améliorer notre équilibre à travers des entraînements (Zijlstra, Mancini, Chiari & Zijlstra, 2010 ; Barcala et al., 2013 ; Halicka, Lobotkova, Buckova & Hlavacka, 2014 ; Lakhani & Mansfield, 2015). De nombreuses recherches ont été réalisées au sujet de l'impact d'un feedback (FB) visuel sur l'équilibre. Ces études visent principalement les sujets ayant des difficultés à ce niveau-là, c'est-à-dire les personnes âgées ou les personnes ayant subi un AVC. En

effet, le système nerveux central vieillit aussi avec l'âge. Le système sensoriel devient donc moins sensible et l'équilibre devient ainsi plus difficile à maintenir, ce qui explique pourquoi les chutes sont assez fréquentes chez les personnes âgées (Maki & McIlroy, 1996). Il est aussi commun que les sujets ayant subi un AVC rencontrent des troubles du contrôle postural. Ces instabilités s'observent par des oscillations corporelles plus importantes chez ces personnes-là (Dickstein & Abulaffio, 2000). C'est pourquoi de nombreuses études se sont intéressées sur l'entraînement de l'équilibre chez ces deux types de personnes. Parmi celles-ci, beaucoup ont examiné l'utilisation d'un FB visuel comme outil de travail pour la réhabilitation des victimes d'AVC. L'idée est qu'en donnant aux patients une information visuelle supplémentaire, ils auront une meilleure conscience des mouvements et de l'orientation de leur corps dans l'espace (Dault, De Haart, Geurts, Arts & Nienhuis, 2003).

1.2.1 Type de feedback visuel. Un type de FB régulièrement utilisé pour l'entraînement d'équilibre est celui du CP projeté continuellement face aux sujets installés sur une plaque de force. Leur but étant de minimiser les mouvements du CP en position statique (Dault et al., 2003 ; Rougier, 2009). Ce modèle d'entraînement apparaît être efficace pour réduire les oscillations posturales et améliorer le maintien de l'équilibre chez les personnes âgées (Zijlstra et al., 2010). Cependant, le CP représente en quelque sorte une variable permettant de contrôler ce qui nous intéresse particulièrement : le CG. Souvent, les études sur le contrôle postural ne distinguent pas le CP du CG (Lakhani & Mansfield, 2015). Des recherches ont montré que le FB visuel du CP peut en effet réduire la variabilité des mouvements du CP ainsi que celle du CG (Rougier, 2003). Ce qui est maintenant intéressant et ce sur quoi Lakhani et Mansfield (2015) se sont penchés, c'est de savoir si un FB du CG a le même effet qu'un FB du CP sur une simple tâche d'équilibre statique. L'hypothèse était que les sujets recevant un FB visuel de leur CG en position debout sur une surface instable montreraient une meilleure capacité à réduire leurs oscillations des CP et CG que les sujets recevant un FB visuel de leur CP. Les participants devaient tenir 35 secondes pour chaque essai, qu'il soit avec ou sans FB (fixer une cible). Si l'essai était avec FB, ils percevaient uniquement leurs mouvements antéro-postérieurs, soit de leur CG, soit de leur CP, dépend le groupe dans lequel ils étaient attribués, afin de réduire la complexité du FB et de se concentrer uniquement sur une seule direction. Le FB était présenté sous forme de ligne horizontale. L'étude comprenait uniquement deux sessions. En analysant dans un premier temps les essais avec et sans FB pour le groupe CG, les mouvements du CG étaient significativement moins marqués avec la visualisation du FB comparé aux essais sans FB. En revanche, pour le groupe visualisant le CP, il n'y a pas eu de

différence significative entre les essais avec ou sans FB. Cependant, le groupe CG partait avec une moyenne d'instabilité plus élevée, ce qui leur laissait une plus grande marge de progression et ce qui explique donc leurs meilleurs résultats. L'étude conclut finalement que les deux types de FB (avec CG ou avec CP) ont donc la même efficacité (Lakhani & Mansfield, 2015). Une autre étude comparant les différences entre un FB visuel du CP et du CG a été réalisée par Takeda et al. (2017). Celle-ci comprenait trois groupes : un groupe CP, qui recevait un FB visuel de leur CP uniquement, un groupe CP + CG, qui recevait un FB visuel et leur CP et de leur CG, ainsi qu'un groupe contrôle qui n'avait pas de FB, mais une cible à fixer. Les résultats de cette étude suggèrent qu'un entraînement fournissant un FB visuel du CP et du CG simultanément apporterait une plus grande amélioration de la stabilité posturale qu'un entraînement fournissant que le CP comme FB visuel.

La visualisation des déplacements du CP est le FB le plus couramment utilisé, cependant l'étude de Halicka et al. (2014) a testé l'efficacité de différents biofeedbacks visuels sur l'équilibre postural. Les 20 jeunes sujets devaient se maintenir le plus stable possible sur une surface ferme ainsi que sur une surface molle en visualisant soit les mouvements de leur CP (CoP), soit les mouvements de leur tronc inférieur (L5), soit les mouvements de leur tronc supérieur (Th4), soit rien (EO). Les résultats (figure 4 et 5) ont montré une diminution significative des oscillations corporelles lors des conditions avec FB. La localisation du FB visuel (CoP, L5 ou Th4) a une forte influence sur les différents segments corporels. C'est-à-dire que par exemple, les mouvements du tronc inférieur étaient au plus bas lorsque le FB visuel représentait les oscillations du tronc inférieur (L5). Comme on peut le voir sur les figures 4 et 5, les visualisations du CoP et de L5 semblent être les meilleures représentations visuelles afin de diminuer les oscillations posturales. Le FB visuel prouve une fois de plus son effet stabilisateur sur le contrôle de l'équilibre (Halicka et al., 2014).

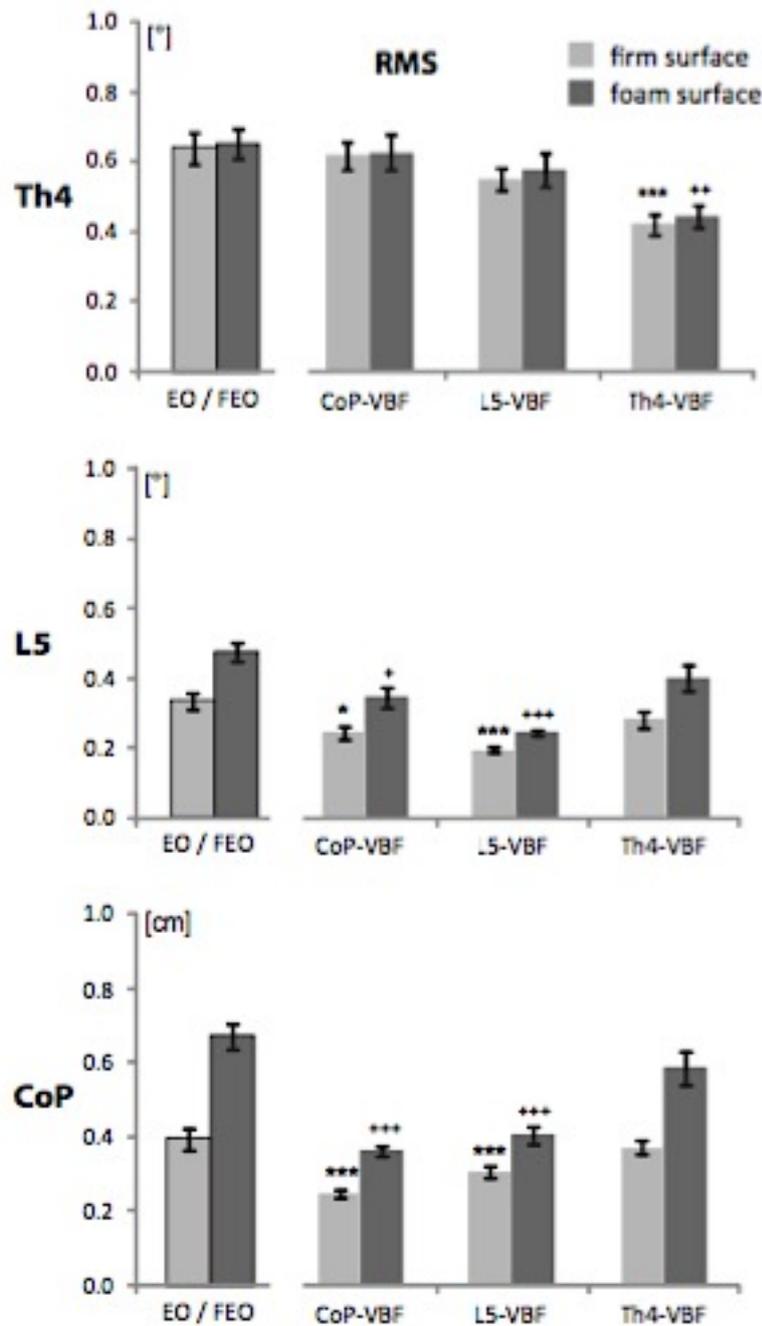


Figure 4. Moyennes du RMS du CoP, de L5 et de Th4 en position debout sur les deux types de surfaces durant la condition contrôle (EO / FEO) et les trois conditions de FB visuel (CoP-VBF, L5-VBF, Th4-VBF). Différences entre la tâche sans FB (EO / FEO) et avec FB (CoP, L5, Th4) et entre les deux types de surface, dure (gris clair) et molle (gris foncé) (Halicka et al, 2014).

L’outil principalement utilisé pour les études d’équilibre utilisant ce type de FB visuel est la plaque de force. Cependant, certaines études ont utilisé un outil beaucoup plus accessible : la Wii Balance Board. Cet outil, accessible à tous, permet à la population de travailler son équilibre de manière ludique et utilise le même principe que la plaque de force : le FB visuel du CG. Quelques études se sont donc penchées sur cet outil de travail afin de tester son efficacité.

té. L'étude de Cho, Lee et Song (2012) s'est intéressée à l'amélioration de l'équilibre chez des patients victimes d'AVC chroniques et a comparé deux groupes d'entraînement. Les deux groupes ont suivi un programme de réhabilitation standard de 6 semaines, avec 5 entraînements de 60 minutes par semaine. Cependant, un des groupes participait 3 fois par semaine durant 30 minutes à un entraînement d'équilibre en réalité virtuelle sur la Wii Balance Board. Ces 30 minutes d'entraînement en réalité virtuelle consistaient en différents jeux où un avatar représentait et copiait les mouvements des sujets. Ces derniers devaient effectuer par exemple un slalom à ski, un saut à ski ou encore une descente en rivière. En somme, des jeux qui mettaient le corps en mouvement grâce à des déplacements du CM. Dans les résultats, ce groupe a montré une amélioration significative concernant l'équilibre dynamique à l'inverse du groupe contrôle. Au niveau de l'équilibre statique, il n'y a pas eu d'amélioration significative dans les deux groupes.

Une autre étude assez similaire prenant en compte 20 sujets adultes hémiparétiques divisés en deux groupes (un suivant un programme standard et l'autre suivant le programme standard plus des séances d'exercices sur la Wii Balance Board) et s'entraînant sur 5 semaines avec 2 sessions par semaine n'a quant à elle pas montré de différence significative entre les deux groupes. Ces derniers se sont toutefois améliorés significativement dans toutes les variables étudiées, c'est à dire dans la symétrie corporelle, l'équilibre statique, l'équilibre fonctionnel et la mobilité fonctionnelle (Barcala et al, 2013).

1.2.2 Comparaison entre jeunes, personnes âgées et victimes d'AVC. Bien que de nombreuses études s'intéressent à l'équilibre chez les personnes âgées ou victimes d'AVC, l'équilibre est un facteur primordial tout au long de la vie et certaines études, moins nombreuses, se sont également penchées sur l'effet de l'entraînement d'équilibre chez les jeunes. C'est le cas de l'étude de Dault et al. (2003), qui a pour but d'évaluer l'utilité et l'influence d'un FB visuel sur le contrôle postural de deux tâches (tenir en station debout et transfert de poids) chez trois groupes de personnes : les jeunes, les personnes âgées et les victimes d'AVC. Cette étude a mis en place un FB visuel du CP individualisé, c'est-à-dire que les limites utilisées pour ce FB étaient proportionnelles aux capacités posturales de chaque participant. 15 sujets jeunes, 15 sujets âgés et 10 victimes d'AVC ont pris part à cette étude. Les participants exécutent leurs tâches d'équilibre statique (45 secondes) dans trois conditions expérimentales : soit en visualisant le FB de leur CP (VF), soit en ayant le FB qui disparaît après 15 secondes (No VF), soit en condition contrôle (EO), afin d'observer s'ils sont capables de maintenir le même niveau de contrôle dans les trois différentes tâches en intégrant

les informations sensorielles de tous les systèmes sensoriels plutôt que de se concentrer uniquement sur le FB visuel du CP. Lors de la condition VF, il fallait maintenir le CP, représenté par un point noir, à l'intérieur d'un carré (individualisé). Pour la condition No VF, le point noir représentant le CP disparaissait après 15 secondes. Les participants devaient cependant maintenir l'équilibre jusqu'à la fin des 45 secondes en ayant plus que le carré sur l'écran. La dernière condition pour l'équilibre statique était une condition contrôle, c'est-à-dire que les participants devaient simplement maintenir la position stable face à un écran blanc, les yeux ouverts (EO). Pour les trois conditions, la consigne était de maintenir le plus stable et symétrique possible.

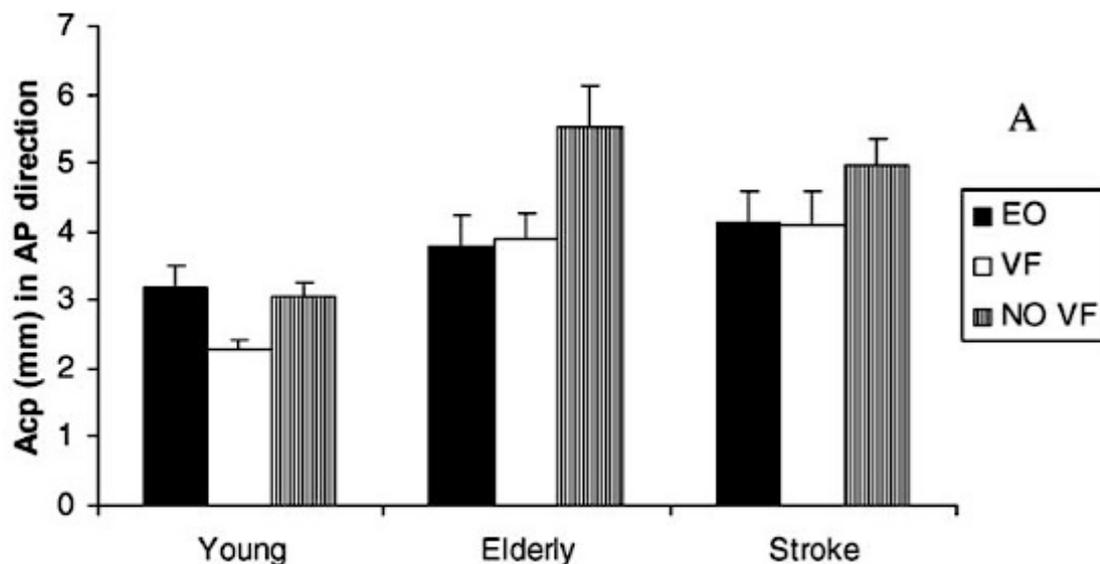


Figure 5. Moyenne des oscillations corporelles sur le plan sagittal pour les tâches d'équilibre statique sous les trois conditions (EO, VF, NoVF) et pour les trois groupes (Dault et al., 2003)

Les résultats (figure 5) montrent qu'uniquement les jeunes ont réussi à réduire significativement (29.2%) l'amplitude de leurs oscillations posturales sur le plan sagittal avec l'addition du FB visuel. En revanche, les deux autres groupes n'ont pas réussi à réduire l'amplitude de leurs oscillations avec le FB visuel. Cependant, lorsque le FB visuel a été retiré après les 15 premières secondes dans la condition NoVF, une forte déstabilisation a été remarquée dans les groupes des personnes âgées et AVC, ce qui explique pourquoi la moyenne des conditions NoVF est plus élevée. Sur le plan frontal en revanche (figure 6), les deux groupes (jeunes et AVC) ont réduit significativement, de 20.7% et 20.3% respectivement, l'amplitude de leurs oscillations avec la condition FB visuel (Dault et al., 2003).

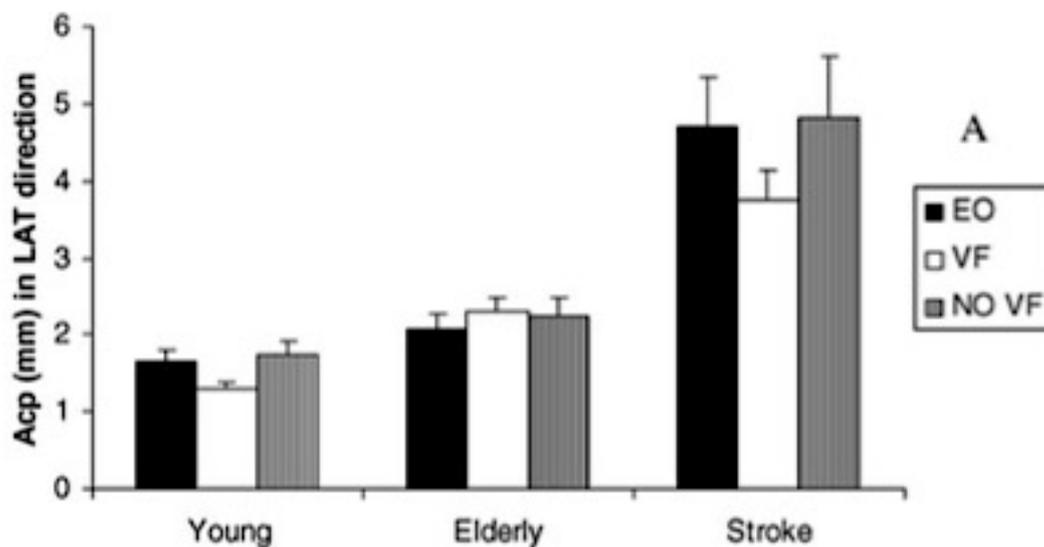


Figure 6. Moyenne des oscillations corporelles sur le plan frontal pour les tâches d'équilibre statique sous les trois conditions (EO, VF, NoVF) et pour les trois groupes (Dault et al., 2003)

L'explication pour laquelle les personnes âgées et les victimes d'AVC n'améliorent pas significativement leur équilibre sur le plan sagittal avec l'ajout du FB visuel pourrait être due à l'affaiblissement du système sensoriel associé à la vieillesse. En supprimant le FB visuel à 15 secondes, les participants ont dû soudainement compter sur les autres systèmes sensoriels et non plus principalement sur la vision afin de minimiser leurs mouvements posturaux. De nouveau, la déstabilisation observée dans les groupes plus âgés est probablement liée aux effets de la vieillesse. En plus d'être affaiblies sur le plan sensoriel, les personnes âgées éprouvent plus de difficultés à procéder au changement d'attention, ce qui peut expliquer cette soudaine déstabilisation. Une autre explication concernant ces résultats serait que les jeunes auraient tendance à mieux anticiper le maintien postural que les deux autres groupes, ce qui leur permet de réguler adéquatement leur CP. Il est à noter qu'ici, l'étude se déroule sur une séance et ne concerne pas une série d'entraînements. Le temps d'adaptation est très court et il est donc difficile pour les personnes âgées de s'habituer si rapidement au FB visuel, contrairement aux jeunes (Dault et al., 2003).

Au vu des différentes études menées à ce sujet, le FB visuel interne représente un entraînement prometteur pour améliorer le contrôle postural en station debout (Dos Anjos, Lemos & Imbiriba, 2016) et aurait par conséquent tendance à apporter une amélioration de la performance posturale, que ce soit en équilibre statique ou dynamique (Sayenko et al., 2010).

1.3 Objectif du travail

Au vu des différentes études qui ont été conduites à ce sujet, l'idée de ce travail est d'évaluer l'efficacité d'un entraînement d'équilibre chez des jeunes adultes ayant comme FB visuel leur CM représenté au centre d'une cible. Le but étant d'analyser les résultats du groupe avec FB visuel et de le comparer avec un groupe contrôle, qui lui s'entraîne sans FB visuel. L'objectif principal étant de répondre à la question suivante :

- a) Quelle méthode d'entraînement permet un meilleur rendement quant au travail de l'équilibre?

En raison de la littérature relative à ce thème, nous avons formulé l'hypothèse suivante :

H0 : Un entraînement avec un FB visuel du CM n'amène pas une meilleure amélioration de l'équilibre qu'un entraînement sans FB visuel.

H1 : Un entraînement avec un FB visuel du CM amène une meilleure amélioration de l'équilibre qu'un entraînement sans FB visuel.

2 Méthode

2.1 Échantillon

17 sujets (10 hommes et 7 femmes) ont pris part à cette expérience. Pour correspondre aux critères d'inclusion, les participants devaient avoir entre 18 et 35 ans et être en bonne santé physique et mentale. Les sujets (âge moyen 25.2 ± 1.75 années, poids moyen 71.6 ± 13.8 kg, taille moyenne 176.2 ± 9.2 cm) nécessaires ont été aléatoirement dispersés en deux groupes : groupe contrôle ($n=8$, 5 hommes et 3 femmes) et groupe FB visuel ($n=9$, 5 hommes et 4 femmes).

Tous les participants, préalablement informés sur le déroulement de l'expérience, ont accepté de participer à l'étude de leur plein gré et signé une déclaration de consentement attestant qu'ils avaient lu et compris les informations de l'étude, qu'ils avaient le droit de se retirer de l'étude à tout moment et que l'étude garantissait leur anonymat. Un seul participant a été exclu suite à une blessure au genou, l'empêchant de poursuivre les entraînements.

2.2 Procédure expérimentale

Comme le montre la figure 7, chaque participant a exécuté un pré-test permettant d'évaluer sa performance initiale d'équilibre, puis a suivi 6 entraînements d'équilibre en fonction de la méthode qui lui avait été attribuée. Une fois les entraînements terminés, les participants ont passé un post-test, permettant d'évaluer leur évolution. Les séances se répartissaient de manière à ce qu'il y ait 3 entraînements par semaine ainsi qu'une pause de 24h entre chacun d'eux. Le tout s'étalait donc sur 2 à 3 semaines.

Les pré et post tests se passaient dans les mêmes conditions pour les deux groupes. Installés dans une salle noire, ils exécutaient 4 exercices d'équilibre différents face à un écran blanc uni. La lumière était éteinte afin de minimiser au maximum toute distraction visuelle autre que l'écran. L'ordre des 4 exercices était aléatoire pour chaque participant et ceux-ci consistaient en une posture d'équilibre à maintenir le plus stablement possible durant 40 secondes. L'idée étant de tester l'équilibre de manière statique, mais variée, les exercices consistaient à maintenir ces quatre différentes positions : position de l'envol sur la pointe des pieds, position unipodale sur une mousse, position du tandem avec les yeux fermés ainsi que position station debout pieds joints sur une demi-sphère molle.

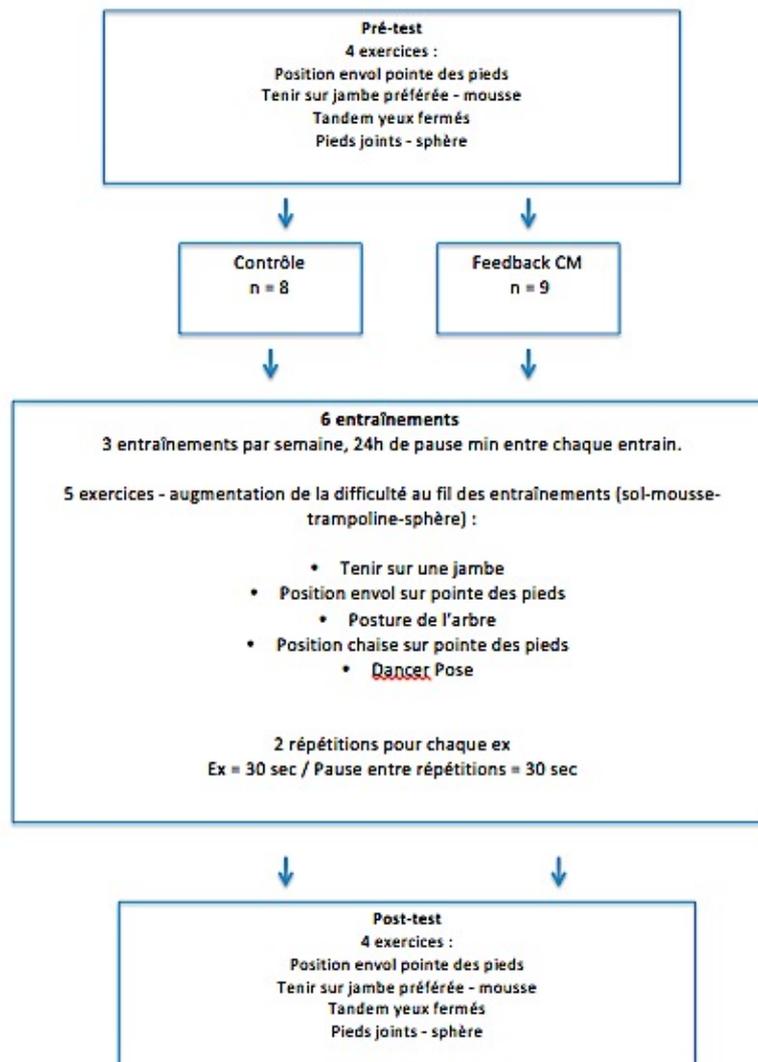


Figure 7. Protocole expérimental.

Chaque séance d'entraînement débutait avec un court échauffement, durant lequel les sujets devaient entre autres tenir quelques secondes en position unipodale (sur chaque jambe) ainsi que s'habituer à la demi-sphère. S'en suivait un test intermédiaire semblable au pré-test, permettant un suivi sur la progression des sujets. Suite à cela, les sujets poursuivaient avec les 16 minutes effectives de l'entraînement. Celui-ci se passait en revanche différemment pour les deux groupes expérimentaux. Tous deux avaient les mêmes 5 exercices à effectuer dans le même ordre, 30 secondes par exercice, 2 répétitions pour chacun d'eux et 30 secondes de pause entre chaque élément. Cependant les méthodes d'entraînement différaient.

Pour le groupe FB, lorsqu'ils exécutaient les différentes postures, leur CM était projeté dans une cible face à eux et celui-ci devait rester le plus au centre possible (figure 8 et 9). Plus leur CM était stable, plus leur posture était équilibrée.



Figure 8. Feedback visuel représentant le CM projeté à l'intérieur d'une cible.



Figure 9. Sujet exécutant sa tâche d'équilibre statique face au feedback visuel.

Pour le groupe contrôle, il n'y avait pas de FB visuel instantané sur leur performance, mais uniquement un écran blanc face à eux. Il est à noter que le chronomètre était visible au sommet de l'écran pour les deux groupes.

2.3 Mesures

Bien que généralement l'outil de mesure utilisé pour les études d'équilibre soit la plaque de force, pour ce travail nous avons utilisé l'OptiTrack. Celui-ci permet une représentation en 3D des mouvements des participants. Pour ce faire, les sujets portent une combinaison noire ainsi que 41 marqueurs répartis sur tout le corps, ce qui permet au système de mesurer les mouvements corporels (figure 10). Ainsi, la variabilité du corps a pu être mesurée et les données ont directement été récoltées dans un fichier Excel. Les mesures ont été prises uniquement lors des tests, et non lors de l'entraînement. Les quatre exercices à effectuer duraient 40 secondes chacun, mais les valeurs analysées correspondent aux 10 meilleures secondes de chaque exercice.

Pour le groupe FB, la représentation visuelle du CM a été créée à partir d'un algorithme basé sur les segments du corps. De cette manière, la représentation du CM était fidèle à celle du participant.

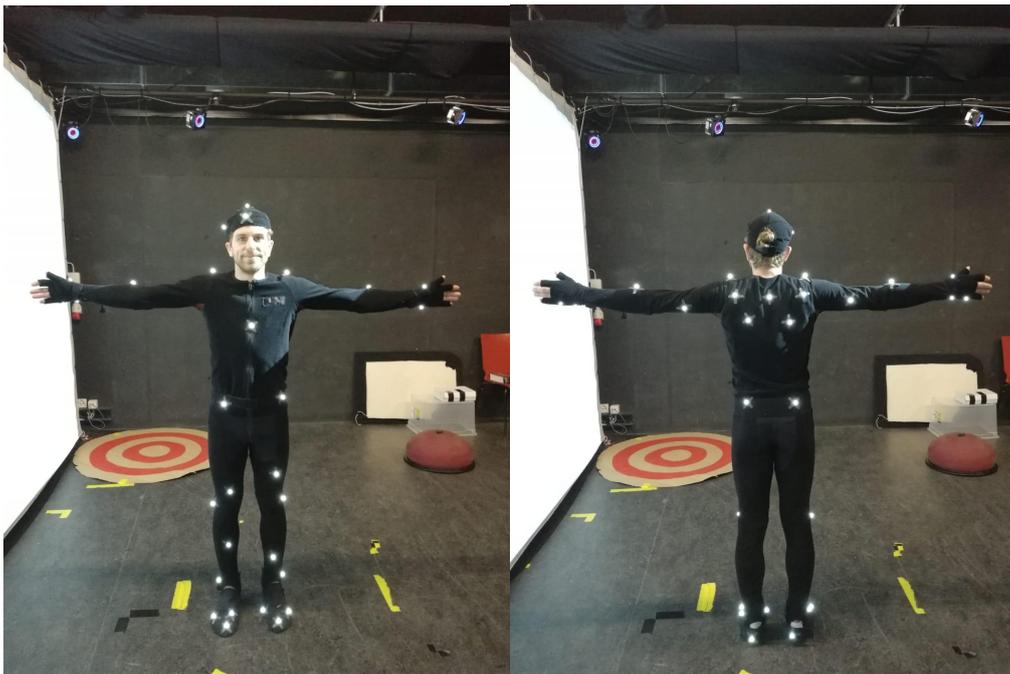


Figure 10. 41 marqueurs répartis sur tout le corps afin de mesurer les mouvements corporels.

2.4 Analyse statistique des données

Les données quantitatives ont donc été récoltées par le système Optitrack et son application Motive. L'analyse statistique des données a été effectuée à l'aide du programme RStudio version 1.1.414. Pour le traitement des données de cette expérience, il a été nécessaire de définir les différentes variables utiles à l'analyse. Les variables indépendantes pour cette expé-

rience sont les groupes (FB ou contrôle) et les sessions (pré et post tests). Les variables dépendantes correspondent aux résultats obtenus dans les quatre exercices effectués lors du pré et post test.

Pour commencer, des T-Test ont été réalisés afin de comparer les résultats des pré et post tests de chaque exercice pour chaque groupe. Puis une Anova a également été effectuée pour comparer les deux groupes, pour comparer les différents exercices et pour déterminer les interactions entre les variables. Le niveau de significativité a été défini à $p \leq 0.05$ avec une correction de Holm.

3 Résultats

Au premier coup d'œil, l'observation des résultats sur Excel montre une tendance à l'amélioration suite aux 6 sessions d'entraînement d'équilibre dans les deux groupes, comme le montre les figures 11, 12 et 13. En analysant la moyenne des quatre exercices au pré et au post test (figure 11), on peut voir que les deux groupes se sont améliorés lors du post-test, de manière à peu près égale. En analysant la moyenne des quatre exercices pour chacun des sujets séparément, on observe une amélioration lors du post test dans la majorité des cas (figures 12 et 13).

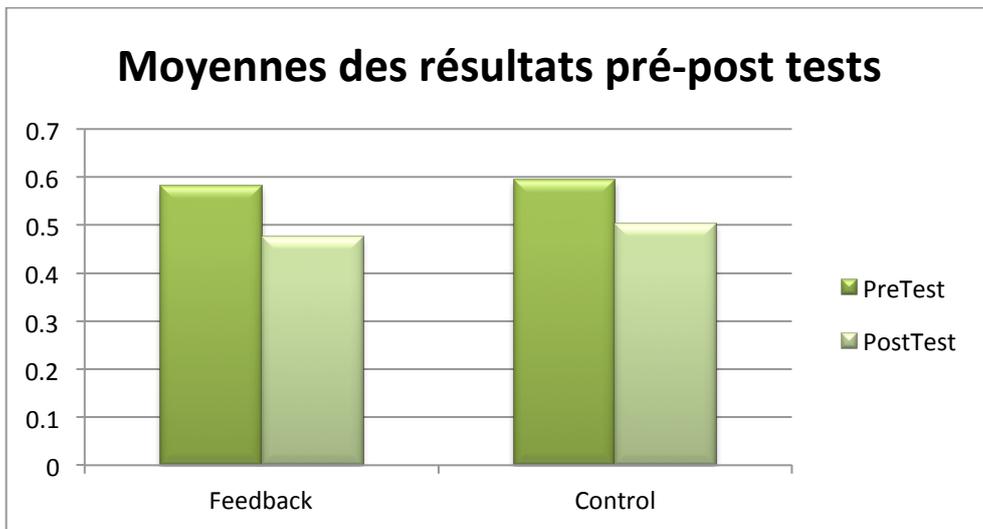


Figure 11. Moyennes des quatre exercices du pré et du post test pour chacun des groupes.

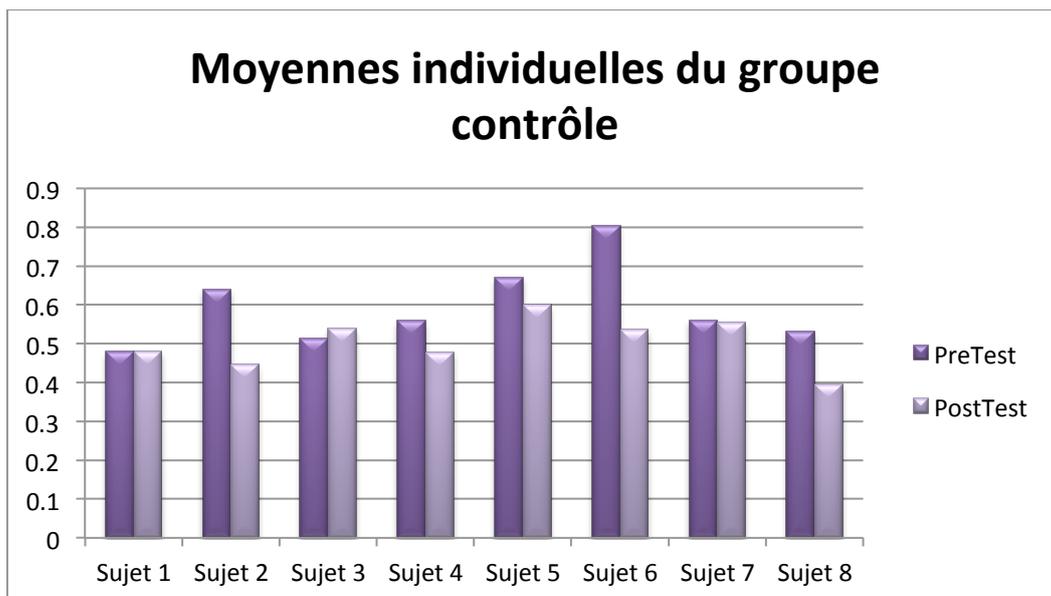


Figure 12. Moyennes des quatre exercices du pré et du post test pour chacun des sujets du groupe contrôle.

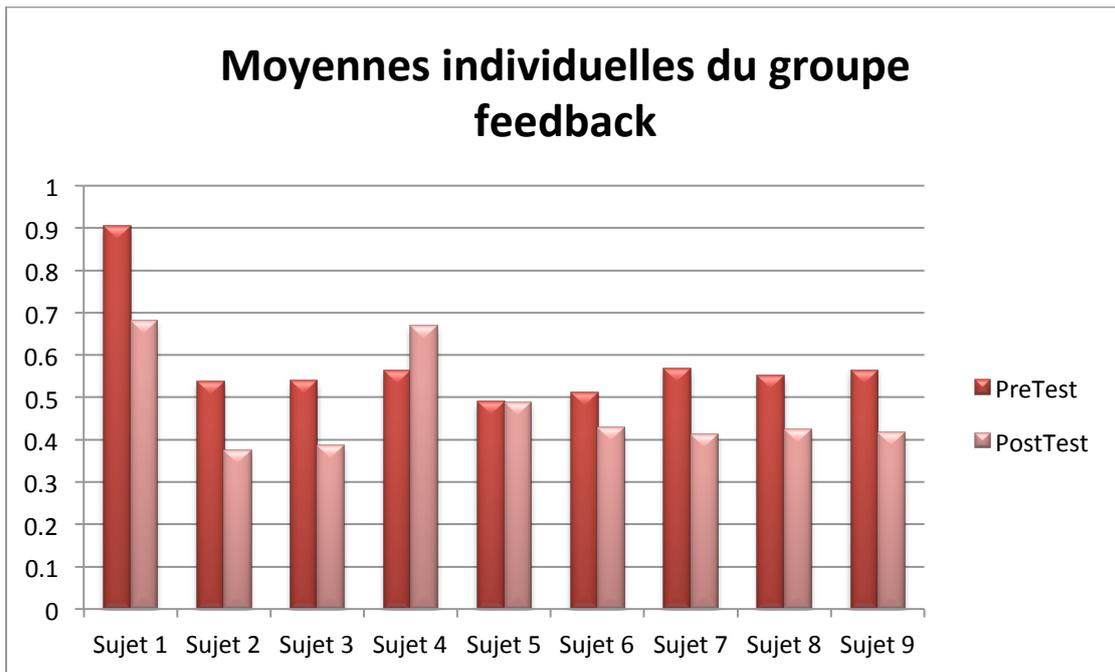


Figure 13. Moyennes des quatre exercices du pré et du post test pour chacun des sujets du groupe feedback.

L'analyse plus approfondie des résultats a ensuite été effectuée à l'aide de RStudio. Nous avons dans un premier temps testé la normalité des données et l'homogénéité des variances. Les données étant paramétriques et homogènes, nous avons effectué des T-tests pour comparer les résultats pré-post tests de chacun des groupes, pour chaque exercice.

Tableau 1

Résultats de significativité des quatre exercices du groupe contrôle

Variable	T-test	P-value	Significativité
Exercice 1	$t = 0,73288$	$p = 0,487$	Non
Exercice 2	$t = 2,3263$	$p = 0,052$	Non
Exercice 3	$t = 2,742$	$p = 0,028$	Oui / Non (avec correction de Holm)
Exercice 4	$t = 0,71945$	$p = 0,495$	Non

Note. Ces valeurs représentent la comparaison pré-post test pour les quatre exercices. La dernière colonne nous indique si les résultats se sont montrés significatifs ou non, en sachant que le niveau de significativité a été défini à $p \leq 0.05$. $t = t$ -statistique pour la comparaison pré-post test (t-test). $p = p$ -value.

Tableau 2

Résultats de significativité des quatre exercices du groupe feedback.

Variable	T-test	P-value	Significativité
Exercice 1	$t = 1,5261$	$p = 0,165$	Non
Exercice 2	$t = 1,4117$	$p = 0,195$	Non
Exercice 3	$t = 2,2377$	$p = 0,055$	Non
Exercice 4	$t = 3,2528$	$p = 0,011$	Oui / Non (avec correction de Holm)

Note. Ces valeurs représentent la comparaison pré-post test pour les quatre exercices. La dernière colonne nous indique si les résultats se sont montrés significatifs ou non, en sachant que le niveau de significativité a été défini à $p \leq 0.05$. $t = t$ -statistique pour la comparaison pré-post test (t-test). $p =$ la p-value.

Pour vérifier la significativité de l'exercice 3 du groupe contrôle et l'exercice 4 du groupe FB, nous avons procédé à la correction de Holm. Ces deux résultats s'avèrent finalement non significatifs. Comme nous pouvons le constater sur les tableaux 1 et 2, aucun résultat n'a été significatif.

Pour le premier exercice, qui consistait à maintenir en position bipodale sur la pointe des pieds, les deux groupes se sont légèrement améliorés, mais de manière non significative (figure 14). L'amélioration est plus marquée pour le groupe FB.

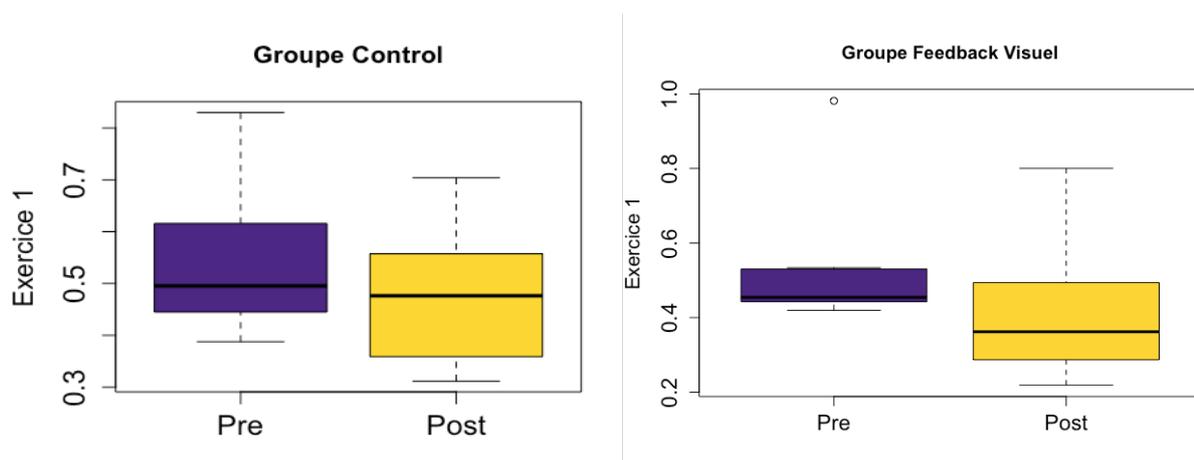


Figure 14. Résultat des performances de l'exercice 1 – exercice de l'envol – des groupes contrôle et feedback visuel.

Pour le deuxième exercice, les sujets devaient maintenir sur une seule jambe (celle qu'ils préféraient) sur une mousse. De nouveau, on observe sur la figure 15 une amélioration dans les deux groupes, cependant, il n'y a rien de significatif.

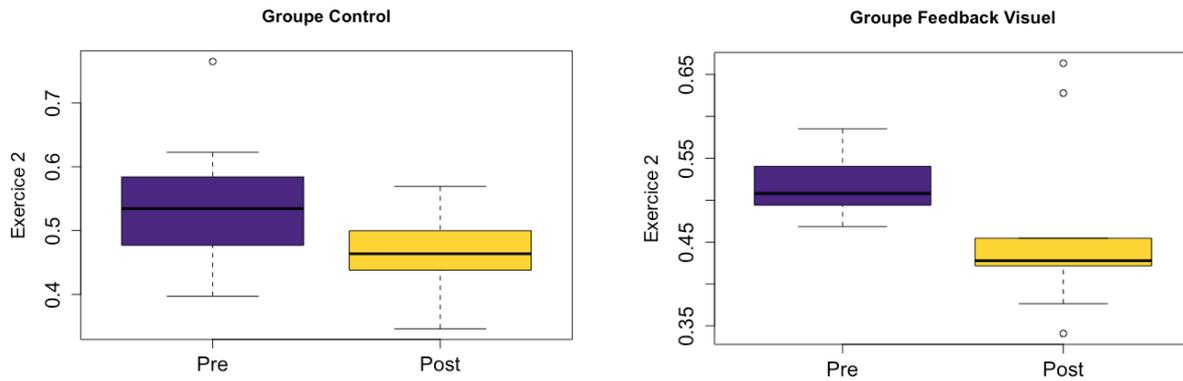


Figure 15. Résultat des performances de l'exercice 2 – exercice monopodal sur surface en mousse – des groupes contrôle et feedback visuel

Pour le troisième exercice, la position du tandem les yeux fermés, une amélioration est également notable dans les deux groupes, de manière non significative (figure 16). L'amélioration est plus marquée dans le groupe contrôle.

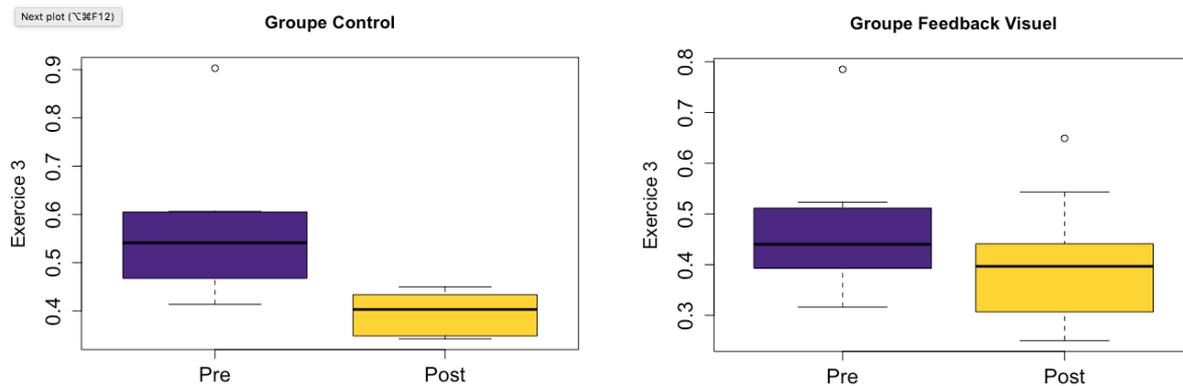


Figure 16. Résultat des performances de l'exercice 3 – exercice du tandem – des groupes contrôle et feedback visuel.

Le dernier exercice consistait à maintenir sur une demi-sphère molle en station debout, les pieds joints. Comme on peut le voir sur la figure 17, on distingue une amélioration uniquement dans le groupe FB. Elle n'est toutefois pas significative.

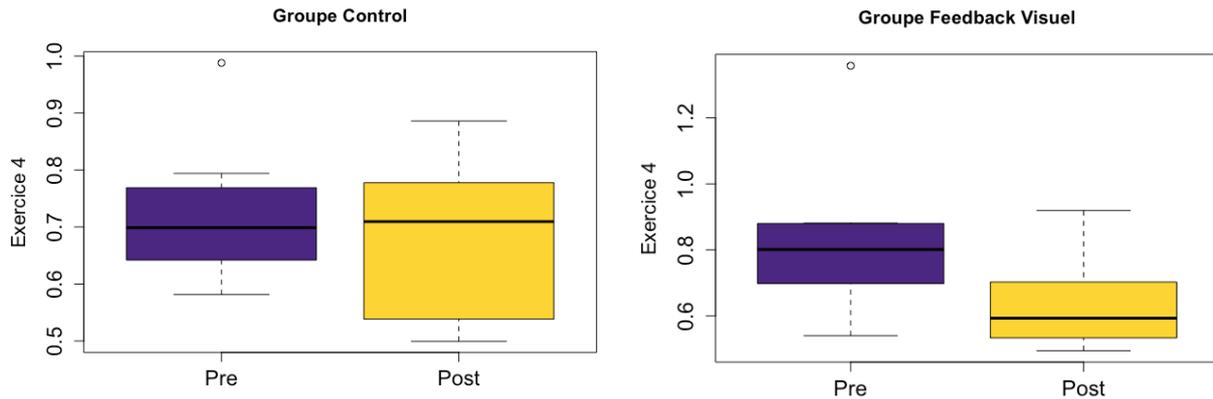


Figure 17. Résultat des performances de l'exercice 4 – station debout sur la sphère – des groupes contrôle et feedback visuel.

Dans un deuxième temps, nous avons effectué une Anova permettant de comparer les différences entre les deux groupes, les différences entre les exercices et les interactions entre les exercices et les groupes. Aucun résultat significatif n'a été observé comme le montre la figure 18.

```

Error: Subject
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Groupe  1 0.0035  0.00349   0.086  0.774
Residuals 15 0.6114  0.04076

Error: Subject:Condition
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Condition  3 0.0297  0.00990   0.494  0.6885
Groupe:Condition  3 0.1459  0.04864   2.425  0.0779 .
Residuals  45 0.9023  0.02005
---

```

Figure 18. Significativité de l'Anova. Aucune différence significative n'est à relever.

L'Anova nous montre (figure 19) qu'il n'y a pas de différence significative ($p = 0.774$) entre les deux groupes en comparant les résultats du pré et du post test.

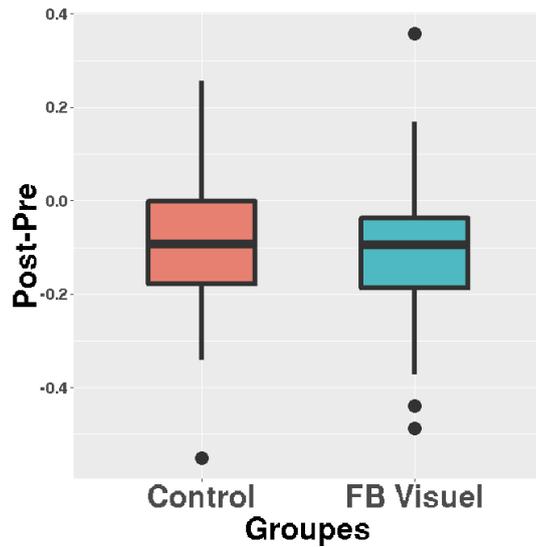


Figure 19. Résultat des différences pré test – post test dans les deux groupes.

La figure 20 nous montre qu'il n'y a pas de différence significative ($p = 0.688$) entre les quatre exercices les deux groupes confondus. Aucun exercice n'a montré une amélioration suffisamment importante pour qu'elle soit significative entre le pré et post test.

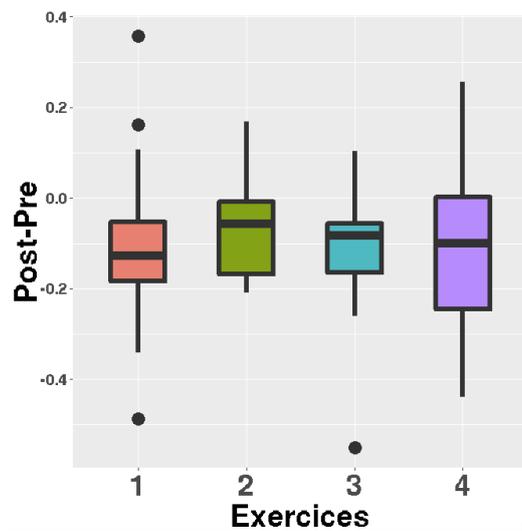


Figure 20. Résultat des différences pré test – post test en fonction des quatre différents exercices.

L'interaction entre groupes et exercices (figure 21) n'est quant à elle pas significative non plus ($p = 0.077$). Aucun résultat (représentant la différence entre pré et post test) n'est significativement différent des autres.

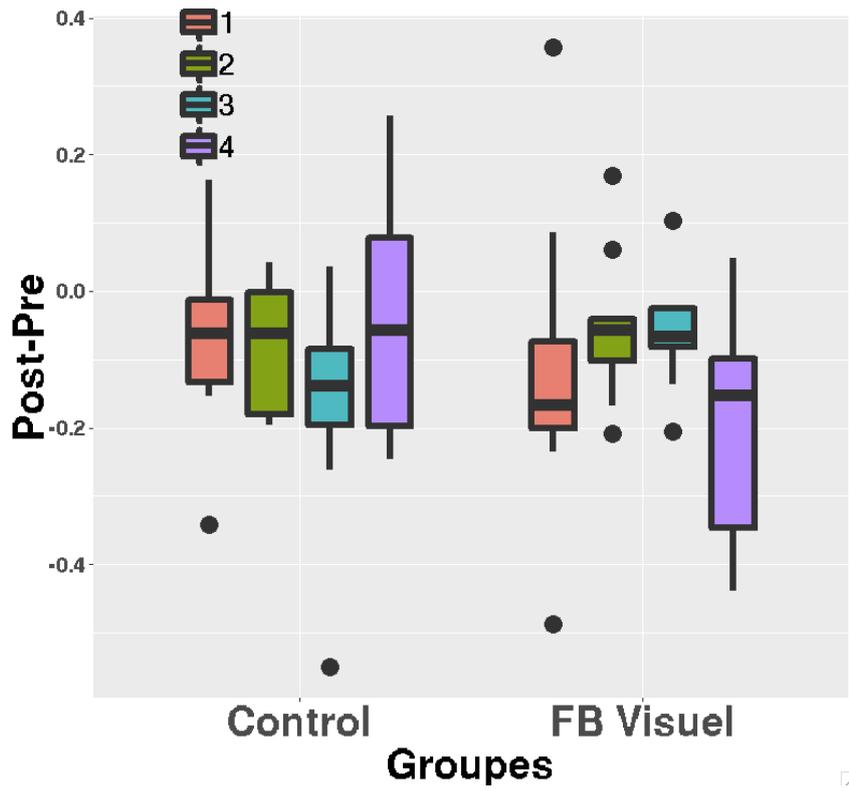


Figure 21. Résultat des différences pré test – post test dans les deux groupes et en fonction des quatre exercices.

4 Discussion

Le but de cette étude était d'évaluer l'efficacité d'un entraînement d'équilibre avec FB visuel chez des jeunes adultes ou plus précisément de répondre à la question de recherche, qui était de savoir quelle méthode d'entraînement permettait un meilleur rendement quant au travail de l'équilibre. L'hypothèse énoncée était qu'un entraînement avec un FB visuel du CM amène une meilleure amélioration de l'équilibre qu'un entraînement sans FB visuel.

Les résultats n'ont pas montré d'effet significatif de l'entraînement avec FB visuel, mais montrent toutefois une tendance vers l'amélioration. Dans ce chapitre, nous allons discuter des différents types d'exercice évalués ainsi que décrire les raisons qui pourraient expliquer la non-significativité de nos résultats.

4.1 Différents types d'exercices évalués

Pour cette étude, nous avons évalué l'équilibre au travers de quatre exercices différents. L'idée était de tester l'équilibre statique d'une manière variée afin d'observer l'évolution sous plusieurs angles. C'est pourquoi une position unipodale, une position bipodale, une position les yeux fermés et une position sur la pointe des pieds ont été évaluées. Bien souvent, ce type d'études concerne les personnes âgées ou victimes d'AVC et a pour but l'amélioration de l'équilibre pour éviter les chutes occasionnelles. C'est pourquoi les exercices proposés se révèlent d'une grande simplicité, comme se maintenir le plus stable possible en station debout (Dault et al., 2003 ; Barcala et al., 2013). Lorsque les études visent des jeunes adultes, l'exercice souvent demandé et évalué est le même, c'est-à-dire le maintien de la position orthostatique, cependant sur une mousse (Halicka et al., 2014 ; Lakhani & Mansfield, 2015 ; Takeda et al., 2017). Ceci augmente la difficulté de l'exercice mais permet tout de même un certain challenge pour les participants et l'on peut plus facilement observer un effet d'entraînement (Lakhani & Mansfield, 2015). Étant donné que pour notre étude le public visé était jeune, l'idée était aussi de mettre plus de difficulté dans les exercices à réaliser afin d'avoir une plus grande marge de progression, c'est pourquoi nous avons demandé ces quatre types d'exercices.

L'exercice 4 consistait donc à tenir en station debout sur une demi-sphère molle, l'exercice typique que l'on retrouve dans les études d'équilibre. Vu que les sujets étaient jeunes, l'exercice était réalisé sur une surface molle, ce qui rendait la tâche plus compliquée. Comme on peut le voir dans les résultats (tableau 2 et figure 17), cet exercice, dans le groupe FB, a eu la meilleure amélioration, bien qu'elle ne soit pas significative. On remarque également sur la

figure 17 que le groupe FB s'est bien plus amélioré que le groupe contrôle pour cet exercice et que sa variabilité reste relativement faible. Ce résultat reflète ce que l'on a pu observer dans les études à ce sujet, dans lesquelles la visualisation des mouvements du CP permettait de diminuer les oscillations corporelles (Dault et al., 2003 ; Halicka et al., 2014).

Un autre exercice évalué lors de notre étude est celui du tandem (exercice 3). Cet exercice met en difficulté le sujet, car, dans cette position, la surface d'appui est réduite (Amblard et al., 1985). De plus, les sujets devaient fermer les yeux. Comme on peut le voir sur la figure 16, suite aux entraînements, le groupe contrôle a une meilleure amélioration et une variabilité plus faible que le groupe FB pour cet exercice, cependant, rien n'est significatif.

La position unipodale (exercice 2) a également été évaluée. Une fois de plus, pour augmenter la difficulté, nous avons demandé de l'exécuter sur une mousse. Les deux groupes se sont légèrement améliorés (figure 15), mais de manière non significative. On observe également que la variabilité a diminué dans les deux groupes après les séances d'entraînement.

Finalement, nous avons observé l'amélioration sur l'exercice de l'envol, position bipodale sur la pointe des pieds (exercice 1). Ici aussi, comme pour la position du tandem, la base de sustentation est plus petite ce qui augmente la difficulté. Comme on peut le voir sur la figure 14, il y a eu très peu d'amélioration pour le groupe contrôle et une amélioration un peu plus marquée pour le groupe FB. C'est un exercice qui a rencontré une grande variabilité dans son exécution. En effet, chaque sujet se met « à sa manière » sur la pointe des pieds, c'est-à-dire que certains lèvent les talons plus que d'autres. Plus les talons sont levés, plus la tâche est difficile. Par conséquent, cet exercice manquait de précision et de régularité.

Il est aussi à noter que lors des entraînements, la difficulté augmentait petit à petit, par le biais de la surface d'appui devenant de plus en plus instable au fil des entraînements. Les séries d'exercices des deux dernières séances d'entraînement s'exécutaient sur le trampoline et la demi-sphère, ce qui augmentait la difficulté de manière conséquente. Certains exercices devenaient particulièrement compliqués, presque impossibles. Avec un niveau d'exercice mal adapté, les sujets ne pouvaient pas travailler leur équilibre efficacement. La différence de difficulté entre les exercices d'entraînement et ceux du test était peut-être parfois trop importante.

Dans l'ensemble, on note tout de même une tendance vers l'amélioration pour les quatre exercices pour le groupe FB visuel (figure 14, 15, 16 et 17). Quant au groupe contrôle, on observe une tendance vers l'amélioration principalement dans deux exercices uniquement : la position du tandem (exercice 3) et la position unipodale (exercice 2). Le résultat qui finalement correspond le plus à nos attentes est celui de l'exercice 4 (figure 17), la position orthostatique sur la

demi-sphère. Ceci étant l'exercice le plus similaire à ce que l'on a pu trouver dans la littérature à ce sujet. Les résultats n'étant pas significatifs, ils ne nous permettent pas de confirmer l'efficacité de la visualisation du CM pour améliorer l'équilibre postural.

4.2 Faiblesses de l'étude

Au vu de nos résultats non concluants et ne démontrant pas l'efficacité de l'entraînement d'équilibre avec FB visuel, nous nous sommes penchés sur les faiblesses de l'étude, autres que la difficulté de certains exercices, qui pourraient peut-être expliquer la non-significativité de nos résultats.

La principale faiblesse de notre étude est la taille de l'échantillon. En effet, avec moins de 10 personnes par groupe, les résultats obtenus ne sont pas particulièrement représentatifs. Il aurait fallu un échantillon plus important qui nous aurait peut-être apporté une meilleure observation de l'effet de l'entraînement d'équilibre avec FB visuel du CM. Non seulement l'échantillon de notre étude était petit, mais il était également extrêmement varié. Nous n'avons pas pris des participants pratiquant le même sport ou ayant le même niveau physique. Par conséquent, nous avons eu des sujets avec des tailles, des masses, des habitudes sportives et des capacités physiques très différentes. Les performances posturales étaient donc très variées de l'un à l'autre. Comme nous l'avons vu précédemment, toutes ces caractéristiques ont une influence sur l'équilibre postural et peuvent favoriser ou défavoriser la personne (Lion et al., 2016 ; Noé, 2016). Cette grande variabilité dans notre petit échantillon a pu également jouer en notre défaveur.

Il faut aussi relever que la période d'entraînement reste relativement courte. Les études sur l'équilibre testant l'impact d'un entraînement avec FB visuel et le comparant avec un entraînement sans FB ont généralement une période d'entraînement plus longue, s'étalant sur 5 à 6 semaines (Cho et al., 2012 ; Barcala et al., 2013). En ajoutant des séances d'entraînement, la progression aurait peut-être été plus grande.

Concernant le déroulement de l'étude, elle a été réalisée de manière à ce que tous les participants s'exercent dans des conditions similaires. Cependant, quelques biais inévitables sont à prendre à compte. Ceux-ci ne sont probablement pas la cause principale de nos résultats non significatifs, mais peuvent avoir eu d'une manière ou d'une autre une influence négative sur le déroulement de l'étude.

Tout d'abord, chaque sujet participait aux 6 entraînements ainsi qu'au post-test, le tout réparti sur 2-3 semaines. Durant cette période, les participants n'avaient aucune contrainte sur leur mode de vie, ils étaient libres de faire ce qu'ils souhaitaient. Par conséquent, certains ont fait

des efforts physiques (de la course par exemple) relativement exigeants durant ces deux semaines d'étude, entre les entraînements d'équilibre. Ainsi, certains arrivaient à la séance avec une certaine fatigue musculaire. La fatigue musculaire engendre une diminution de la force et de la vitesse de contraction musculaire, et donc une perturbation de l'équilibre (Ledin et al., 2004). De ce fait, certains sujets n'étaient parfois pas dans des conditions optimales pour travailler leur équilibre et l'entraînement perdait ainsi son efficacité.

Un autre élément qui a peut-être influencé négativement l'étude est l'irrégularité des heures de passage. Les participants venaient quand ils pouvaient, cela pouvait être le matin comme le soir. Le matin, le corps n'est pas encore totalement « réveillé » et le soir, le corps peut être fatigué de la journée, ce qui peut influencer péjorativement la performance. Il suffit que le post-test ait été placé un matin tôt ou une fin de journée difficile ou alors, pour revenir à ce qui a été dit précédemment, un lendemain d'effort physique intense pour que les résultats soient légèrement faussés par la forme momentanée du sujet. Les heures de tests étaient très variables, les pré et post tests d'un même sujet ne se faisaient pas forcément au même moment de la journée. Il n'y avait donc pas de régularité quant aux horaires des séances et cela a pu également biaiser légèrement les résultats.

Lorsqu'ils exécutaient leurs exercices à l'entraînement, que ce soit pour le groupe contrôle ou FB, le décompte des 30 secondes défilait face à eux, dans le coin de l'écran. Ceci pourrait paraître anodin, cependant, bien souvent, les participants jetaient des coups d'œil à ce chronomètre. Cela représentait au final une petite distraction pour les sujets, qui, pressés de finir l'exercice, ne pouvaient s'empêcher de regarder les secondes défiler plutôt que les mouvements de leur CM. Le chronomètre induisait donc une légère déconcentration du sujet.

La grande sensibilité des mouvements du CM pourrait être vue comme un élément déstabilisant parfois. En effet, le FB était très sensible, c'est-à-dire que le point rouge représentant les mouvements du corps était très réactif, et donc fidèle, aux moindres mouvements corporels. Cette vive réactivité pouvait parfois engendrer plus un déséquilibre qu'un équilibre chez les sujets, notamment lorsque la difficulté des exercices augmentait. Il est vrai que lorsque la tâche à exécuter était spécialement exigeante, telle que la posture de l'arbre sur la demi-sphère, les sujets du groupe FB trouvaient plus facile de fixer un point, plutôt que de fixer les mouvements du CM, bien trop agités. Dans ces situations, les sujets avaient tendance à lâcher du regard le FB, pour se concentrer sur une cible fixe leur permettant de maintenir plus stablement.

Finalement, il est également important de noter que le FB montrait les déplacements du corps sur deux axes : antéro-postérieur et médio-latéral. Étant donné la difficulté de certains exer-

cices, il aurait peut-être été plus judicieux de n'afficher les mouvements que d'une seule direction ; par exemple, seulement les mouvements antéro-postérieurs, comme l'ont fait certaines études (Lakhani & Mansfield, 2015 ; Takeda et al., 2017). Le fait de n'avoir que les mouvements antéro-postérieurs du CM réduit la complexité du FB et permet aux participants de se concentrer uniquement sur la minimisation des mouvements d'une seule direction (Lakhani & Mansfield, 2015). En ayant deux directions à contrôler, comme dans notre étude, la complication de la tâche augmente.

Pour toutes les raisons mentionnées ci-dessus – la taille de notre échantillon, sa variabilité, la difficulté de la tâche, le nombre de séances d'entraînement ou encore certaines irrégularités du protocole – notre étude a en effet montré quelques faiblesses qui pourraient être des causes de nos résultats non concluants ou du moins des aspects à améliorer pour une prochaine étude similaire.

5 Conclusion

La littérature nous montre l'impact bénéfique de la visualisation des mouvements du CG ou du CP pour l'apprentissage de l'équilibre (Zijlstra et al., 2010 ; Barcala et al, 2013 ; Halicka et al., 2014 ; Lakhani & Mansfield, 2015). En effet, ce type de FB permettrait une meilleure représentation du corps dans l'espace et aiderait ainsi à un meilleur maintien de l'équilibre postural (Dault et al., 2003). L'avantage de s'entraîner ainsi permet une progression plus rapide de l'équilibre et ceci peut être particulièrement favorable pour des personnes ayant des faiblesses à ce niveau-là, comme les personnes âgées ou les victimes d'AVC.

L'idée de cette étude était de vérifier l'effet d'un entraînement avec FB visuel sur un groupe de jeunes adultes et de connaître quelle méthode d'entraînement permettrait un meilleur rendement quant au travail de l'équilibre. Nos résultats ont montré une amélioration pour chaque exercice évalué pour le groupe FB visuel. Cependant, la différence de performance entre le pré et post test et la comparaison des résultats avec le groupe contrôle n'a pas été significative. De ce fait, nos résultats nous montrent une tendance vers l'amélioration principalement pour le groupe FB mais ne nous permettent pas de confirmer ce qui a déjà été validé par la littérature, soit l'amélioration favorable de l'équilibre grâce à un entraînement avec visualisation du CM.

Par conséquent, l'hypothèse qu'un entraînement avec un FB visuel du CM amène une meilleure amélioration de l'équilibre qu'un entraînement sans FB visuel n'a pas pu être confirmée. Il faut toutefois noter la principale faiblesse de notre étude qui est celle de la taille de notre échantillon. Avec 17 participants, soit 8-9 personnes par groupe, nos résultats sont peu représentatifs. Une augmentation du nombre de participants serait donc la meilleure correction à apporter pour une prochaine étude dans cette lignée.

Bibliographie

- Amblard, B., Cremieux, J., Marchand, A. R. & Carblanc, A. (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. *Experimental and Brain research*, 61(1), 21-37.
- Aydin, T., Yildiz, Y., Yildiz, C., Atesalp, S. & Kalyon, T. A. (2002). Proprioception of the ankle: a comparison between female teenaged gymnasts and controls. *Foot Ankle International*, 23(2), 123-129. doi:10.1177/107110070202300208
- Barcala, L., Grecco, L. A. C., Colella, F., Lucareli, P. R. G., Salgado, A. S. I. & Oliveira, C. S. (2013). Visual biofeedback balance training using Wii Fit after stroke: a randomized controlled trial. *Journal of Physical Therapy Science*, 25(8), 1027-1032. doi:10.1589/jpts.25.1027.
- Bessou, P. & Bessou, M. (2003). Sensibilité cutanée de la sole plantaire, fait et hypothèses. Dans B. Weber & P. Villeneuve (éd.), *Pied, équilibre et traitements posturaux* (p.47-53). Paris: Elsevier Masson.
- Boyas, S. (2016). Proprioception et contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.81-94). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Carter, L. & Heath, B. (1990). *Somatotyping development and applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cawsey, R. P., Chua, R., Carpenter M. G. & Sanderson, D. J. (2009). To what extent can increasing the magnification of visual feedback of the centre of pressure position change the control of quiet standing balance? *Gait and Posture*, 29, 280-284. doi:10.1016/j.gaitpost.2008.09.007
- Chiari, L., Rocchi, L. & Cappello, A. (2002). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17, 666-677. doi:10.1016/S0268-0033(02)00107-9
- Cho, K. H., Lee, K. J. & Song, C. H. (2012). Virtual-reality balance training with a video-game system improves dynamic balance in chronic stroke patients. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 228(1), 69-74. doi:10.1620/tjem.228.69
- Collins, J. J. & De Luca, C. J. (1995). The effects of visual input on open-loop and closed loop postural control mechanisms. *Experimental and Brain Research*, 103(1), 151-163. doi:10.1007/BF00241972

- Dault, M., de Haart, M., Geurts, A., Arts, I. & Nienhuis, B. (2003). Effects of visual center of pressure feedback on postural control in young and elderly healthy adults and in stroke patients. *Human Movement Science*, 22, 221-236. doi:10.1016/S0167-9457(03)00034-4
- Dickstein, R. & Abulaffio, N. (2000). Postural sway of the affected and nonaffected pelvis and leg in stance of hemiparetic patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81(3), 364-436. doi:10.1016/S0003-9993(00)90085-6
- Dos Anjos, F., Lemos, T. & Imbiriba, L. A. (2016). Does the type of visual feedback information change the control of standing balance? *European Journal of Applied Physiology*, 116, 1771-1779. doi:10.1007/s00421-016-3434-7
- Dupui, P. (2016). Bases neurophysiologiques du contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.23-29). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Halicka, Z., Lobotkova, J., Kristina, B. & Hlavacka, F. (2014). Effectiveness of different visual biofeedback signals for human balance improvement. *Gait and Posture*, 39(1), 410-414. doi:10.1016/j.gaitpost.2013.08.005
- Hlavacka, F. & Saling, M. (1986). Compensation effect of visual biofeedback in upright posture control. *Actas Nervosa Superior*, 28(3), 191-196.
- Hrysomallis, C. (2011). Balance ability and athletic performance. *Sports medicine*, 41(3), 221-232. doi:10.2165/11538560-000000000-00000
- Hue, O., Simoneau, M., Marcotte, J., Berrigan, F., Doré, J., Marceau, P., Marceau, S., Tremblay, A. & Teasdale, N. (2007). Body weight is a strong predictor of postural stability. *Gait and posture*, 36(1), 32-38. doi:10.1016/j.gaitpost.2006.07.005
- Isableu, B. & Vuillerme, N. (2016). Contrôle visuel de l'orientation et de l'équilibre postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.55-72). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Janin, M. (2016). Sensibilité cutanée plantaire et contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.95-104). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Karimi, M. T. & Solomonidis, S. (2011). The relationship between parameters of static and dynamic stability tests. *Journal of Research in Medical Sciences*, 16(4), 530-535.

- Lakhani, B. & Mansfield, A. (2015). Visual Feedback of the centre of gravity to optimize standing balance. *Gait and Posture*, 41, 499-503. doi:10.1016/j.gaitpost.2014.12.003
- Ledin, T., Fransson, P. A. & Magnusson, M. (2004). Effects of postural disturbances with fatigued triceps surae muscles or with 20% additional body weight. *Gait and Posture*, 19(2), 184-193. doi:10.1016/S0966-6362(03)00061-4
- Lion, A., Gokeler, A. & Gauchard, G.C. (2016). Sport et contrôle postural chez l'adulte. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.201-211). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Maki, B. E. & McIlroy, W. E. (1996). Postural control in the older adult. *Clinics in Geriatric Medicine*, 12(4), 635-658. doi:10.1016/S0749-0690(18)30193-9
- Meyer, P. F., Oddsson, L. I. & De Luca, C. J. (2004). The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. *Experimental Brain Research*, 156(4), 505-512. doi:10.1007/s00221-003-1804-y
- Nashner, L.M. & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain research*, 150(2), 403-407. doi:10.1016/0006-8993(78)90291-3
- Noé, F. (2016). Bases biomécaniques du contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.5-10). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Noé, F. (2016). Influence des facteurs anthropométriques sur le contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.143-150). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Paillard, T. (2016). Introduction: approche de la posture et de l'équilibration humaines. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.1-2). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Péninou, G. & Colné, P. (2018). *La posture debout*. Paris: Elsevier Masson. Accès à l'adresse: <https://www.elsevier.com/fr-fr/connect/kine-osteo/posture-et-equilibre-deux-notions-differentes>
- Perrin, P. & Vibert, D. (2016). Système vestibulaire et contrôle postural. Dans T. Paillard (éd.), *Posture et équilibration humaines* (p.73-80). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J. & Paule, J. P. (2000). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402-406. doi:10.1191/0269215500cr342oa

- Röijezon, U., Clark, N.C. & Treleaven, J. (2015). Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 1: basic science and principles of assessment and clinical interventions. *Manual Therapy*, 20, 368-377. doi:10.1016/j.math.2015.01.008
- Roll, R., Kavounoudias, A. & Roll, J. P. (2002). Cutaneous afferents from human plantar sole contribute to body posture awareness. *Neuroreport*, 13(15), 1957-61. doi:10.1097/00001756-200210280-00025
- Rougier, P. (2003). Visual feedback induces opposite effects on elementary centre of gravity and centre of pressure minus centre of gravity motions in undisturbed upright stance. *Clinical Biomechanics*, 18(4), 341-349. doi:10.1016/S0268-0033(03)00003-2
- Rougier, P. (2009). Undisturbed stance control in healthy adults is achieved differently along anteroposterior and mediolateral axes: evidence from visual feedback of various signals from center of pressure trajectories. *Journal of Motor Behavior*, 41(3), 197-206. doi:10.3200/JMBR.41.3.197-206
- Sayenko, D. G., Alekhina, M. I., Masani, K., Vette, A. H., Obata, H., Popovic M. R. & Nakazawa, K. (2010). Positive effect of balance training with visual feedback on standing balance abilities in people with incomplete spinal cord injury. *Spinal Cord*, 48(12), 886-893. doi:10.1038/sc.2010.41
- Takeda, K., Mani, H., Hasegawa, N., Sato, Y., Tanaka, S., Maejima, H. & Asaka, T. (2017). Adaptation effects in static postural control by providing simultaneous visual feedback of center of pressure and center of gravity. *Journal of Physiological Anthropology*, 36. doi:10.1186/s40101-017-0147-5
- Winter, D. A. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait and Posture*, 3, 193-214. doi:10.1016/0966-6362(96)82849-9
- Zijlstra, A., Mancini, M., Chiari, L. & Zijlstra, W. (2010). Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations: a systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 7. doi:10.1186/1743-0003-7-58

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes référents le Dr Amandine Dubois et le Dr Thibaud Le Naour pour leur aide et leurs conseils indispensables tout au long de l'étude.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont participé à l'expérience, qui ont donné de leur temps pour toutes ces séances et sans qui le travail n'aurait jamais pu être abouti.