

Travail de Master pour l'obtention du titre Master of Science,
Unité Sciences du Mouvement et du Sport, Département de médecine,
Université de Fribourg

Groupe de recherche – Contrôle et apprentissage moteur

**Asymétrie des charges au niveau des extrémités
inférieures suite à une reconstruction
du ligament croisé antérieur**

Un court entraînement sensorimoteur a-t-il un effet sur les
résultats lors de tests de sauts, de force et d'équilibre ?

Travail réalisé par Marie Bussard
Conseiller : Professeur Wolfgang Taube
Co-conseiller : Martin Keller

Août 2014

Sommaire

Résumé	4
1. Introduction	5
1.1 Contexte de départ	5
1.2. Problématique et question de recherche	7
2. Approche théorique	9
2.1. Anatomie et biomécanique du genou	9
2.1.1. Le ligament croisé antérieur	11
2.2. Mécanismes de blessure et facteurs de risque	12
2.3. Opérations du ligament croisé antérieur	15
2.4. Rééducation après une reconstruction du ligament croisé antérieur	17
2.4.1. Rééducation à court terme	17
2.4.2. Rééducation à long terme	20
2.5. Répartition des charges au niveau des membres inférieurs	21
2.6. Entraînement d'équilibre et symétrie au niveau des membres inférieurs	23
2.7. Mesures de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité du genou	25
3. Méthode	28
3.1. Population de l'étude	28
3.2. Protocole de tests	28
3.3. Tests	30
3.3.1. Tests de sauts	30
3.3.2. Tests de force	31
3.3.3. Test d'équilibre	33
3.3.4. Test de stabilité	33
3.4. Entraînement sensorimoteur	34
3.5. Formation des groupes	34
3.6. Traitement et analyse statistique des données	36

4. Résultats	37
5. Discussion	46
6. Conclusion	51
7. Bibliographie	52
7.1. Articles	52
7.2. Livres	56
7.3. Sites Internet	56
8. Table des illustrations	57
8.1. Figures	57
8.2. Tableau	58
9. Déclaration personnelle	59
10. Droits d'auteur	60
11. Annexes	61
ANNEXE 1 : Note d'information	62
ANNEXE 2 : Consentement	64
ANNEXE 3 : Fiche protocolaire	65
ANNEXE 4 : Questionnaire aux participants	67
ANNEXE 5 : Résultats des tests et graphiques	68
12. Remerciements	76

Résumé

Introduction : Comme Chmielewski (2011) l'a démontré dans son étude, la répartition des charges est déséquilibrée après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur. Le but de ce travail est de mettre en évidence les différences de charges au niveau des membres inférieurs chez des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur lors d'exercices de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité. La recherche s'intéresse également à l'influence éventuelle d'un court entraînement sensorimoteur sur les performances lors des différents tests susmentionnés.

Méthode : 27 sujets ont participé à la recherche. 18 d'entre eux ont subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur, datant de plus de deux ans et les autres participants forment le groupe contrôle. Les sujets sont tous issus d'un milieu sportif. Afin de pouvoir comparer les charges exercées et de mettre en évidence d'éventuelles différences, divers tests ont été réalisés (Drop Jump, Landings, Countermovement Jump, Squats avec barre de 7.5 kg, Squats avec 70% du poids du corps, force max, évaluation subjective de stabilité, Posturomed). Une première série de mesure a été réalisée, servant de ligne de base, puis les sujets ont pris part à un court entraînement d'équilibre. Les mêmes mesures ont à nouveau été prises : elles constituent le post-test et vise à prouver l'efficacité de l'intervention sensorimotrice.

Résultats et conclusion : Sannicandro et al. (2014) ont démontré l'efficacité d'un entraînement sensorimoteur sur la diminution de l'asymétrie au niveau des membres inférieurs. Cependant, après une analyse de variance répétée avec les facteurs intra-sujets de tests, de temps et de jambe et avec le facteur inter-sujet de groupe, on ne trouve aucun résultat significatif prouvant l'efficacité de l'entraînement d'équilibre. En revanche, après une analyse individuelle des tests, un effet d'interaction time*leg*group (time*leg*group effect : $F_{2;23} = 11.108$; $p < 0.001$) est visible pour les mesures d'équilibre.

1. Introduction

1.1. Contexte de départ

Un cinquième des blessures du genou relatives au sport impliquent le ligament croisé antérieur (LCA), structure la plus souvent touchée. La principale conséquence d'une rupture du LCA est une instabilité du genou. Cette dernière peut empêcher le retour au sport des athlètes et implique souvent une retraite sportive anticipée (Kvist, 2004; Schindler, 2012). Les traitements conservateurs peuvent, dans une certaine mesure, augmenter le sentiment de stabilité et de réadaptation, mais l'évaluation objective des résultats et le taux de retour à un niveau préopératoire demeurent faibles (Keays et al., 2007). C'est pourquoi les traitements invasifs sont souvent prescrits pour une reconstruction chirurgicale du LCA, dans le but de retrouver une meilleure stabilité du genou. Ceci permettra aux athlètes de recommencer le sport et de retrouver un mode de vie actif.

Le but de cette étude est de déterminer si la reconstruction du LCA permet aux athlètes d'effectuer des mouvements tels que, par exemple, des sauts ou des atterrissages de la même manière que des sujets contrôles sains. L'étude se centrera principalement sur la répartition de la charge entre la jambe droite et la jambe gauche durant des exercices de force et des sauts ainsi que durant des exercices d'équilibre et de stabilité. L'hypothèse suivante est envisageable : une blessure du LCA provoque une distribution inégale de la charge. Cette inégalité peut s'expliquer par le fait que les sujets ayant subi une blessure du LCA emploient inconsciemment davantage leur jambe saine dans le but de protéger la jambe opérée (Masterarbeitsthemen, 2013, p. 4).

Ces dernières années, plusieurs recherches ont été effectuées concernant la réadaptation après une reconstruction chirurgicale du LCA. En effet, plusieurs études montrent qu'un déséquilibre intervient entre les membres inférieurs, au niveau de la répartition de la charge, lors de différents exercices pouvant être utilisés dans le programme de réhabilitation. Les exercices principaux engendrant des asymétries sont les squats, les sauts verticaux, les enjambements de marches ou les

mouvements latéraux (Chmielewski, 2011, p. 374). Des chercheurs se sont demandé si la force du quadriceps était une preuve de la récupération. Ils ont cherché à mettre en lien cette dernière avec les écarts de répartition de la charge entre le membre opéré et le membre sain afin de voir si la force du quadriceps est effectivement un bon indicateur de récupération (Ernst et al., 2000, pp. 251-253).

Dans la présente recherche, nous n'étudierons que des cas de reconstruction chirurgicale du LCA, sans traiter de cas avec réhabilitation par traitement conservateur. Il existe différents types de reconstructions, mais la plupart des opérations sont faites avec une autogreffe du tiers médian du tendon rotulien. Après une plastie ligamentaire, les patients passent par une phase de réhabilitation postopératoire qui dure au minimum six mois. C'est en effet le temps qu'il faut au corps pour arriver à un stade de ligamentisation suffisante pour pouvoir recommencer le sport (Cazenave, 2013). Cependant le greffon reste encore potentiellement fragile et la reprise des différents sports, sans risque de nouvelle rupture, dépendra de l'intensité des mouvements de pivot et des contacts dudit sport (Rougraff et al., 1993). Différents facteurs entrent en compte durant la réhabilitation. Dans leur étude, Yosmaoglu et al. (2011) ont tenté de mettre en évidence le développement de la coordination motrice, de la force et de la capacité fonctionnelle lors de la réhabilitation et ce, six mois et une année après une opération du LCA. Une amélioration de la force musculaire ainsi que de la capacité fonctionnelle a été relevée. En revanche, la coordination motrice concentrique et excentrique est restée faible. Ils ont donc conclu que la progression de la coordination motrice n'avait pas été influencée par le développement de la force. Voilà pourquoi il est fortement recommandé de développer l'aspect neuromusculaire en incluant des exercices de coordination dans les programmes de réhabilitation et ceci à long terme.

Un point à surveiller durant la réhabilitation est un retour à une symétrie de la répartition de la charge. Des études ont montré, chez certains patients, des asymétries de charge au niveau des membres inférieurs. Il a été établi qu'un sujet opéré du LCA n'ayant pas une répartition symétrique de la charge aura un risque plus élevé de blessure ultérieure. De plus, comme l'ont démontré Chmielewski, Wilk, et Snyder-Mackler (2002) et Neitzel, Kernozek, et Davies (2002) dans leurs études, en cas d'asymétrie de la répartition de la charge, une compensation peut survenir au

niveau de la hanche et de la cheville. Un risque de déséquilibre, et par conséquent de nouvelle blessure, est donc possible.

1.2. Problématique et question de recherche

La problématique qui va être abordée dans ce travail est la suivante : y a-t-il une asymétrie de charge au niveau des membres inférieurs chez un sujet ayant subi une reconstruction chirurgicale du LCA lors de sauts, d'exercices de force, d'équilibre et de stabilité, et ce au moins deux ans après l'opération ? Pouvons-nous relever une différence avec des sujets non opérés ? De plus, nous tenterons d'évaluer l'effet d'un court entraînement sensorimoteur sur les éventuelles asymétries relevées et d'analyser dans quelle mesure ce dernier pourrait réduire les différences observées.

Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une différence de performance existe et se manifeste par une répartition asymétrique des charges entre les deux jambes. En effet, une charge parfaitement symétrique semble irréaliste, étant donné qu'elle n'est même pas observable chez des sujets non blessés (Chmielewski et al., 2002; Neitzel et al., 2002; Paterno et al., 2007). Nous pouvons également supposer que cette différence sera influencée par le court entraînement sensorimoteur.

L'opération doit dater d'au moins deux ans, afin d'éviter les effets positifs que pourraient avoir des séances de physiothérapie sur les résultats. Ce délai a aussi été fixé afin de n'avoir que des sujets n'étant plus influencés par leur psychisme. En effet, il a été constaté que, directement après le retour au sport, bien que le membre opéré soit totalement guéri et le sujet donc physiquement prêt, quelques faiblesses psychologiques dues à la peur de récurrence de blessure pouvaient persister (Elliot, Goldberg, & Kuehl, 2010).

Les résultats concluants de l'étude de Sannicandro et al. (2014) thématissant les effets bénéfiques d'un entraînement d'équilibre sur la symétrie des membres inférieurs nous donne bon espoir quant au le succès de la présente étude. Les sujets ont pris part à douze séances d'entraînement d'équilibre (30 min, 2x/semaine, pendant 6 semaines). Différents tests visant à mesurer la stabilité sagittale et

frontale, la force, la vitesse et l'accélération ont été réalisés. Les bons résultats obtenus par les participants suite à l'intervention sensorimotrice confirment qu'un entraînement d'équilibre peut réduire le degré d'asymétrie au niveau des membres inférieurs.

Les objectifs principaux de ce travail sont donc la mise en évidence des éventuelles différences de charges au niveau des membres inférieurs lors d'exercices de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité. Les deux séances de tests seront entrecoupées d'un court entraînement sensorimoteur. L'efficacité de ce dernier pourra donc être testé. Les résultats des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur seront comparés à ceux du groupe contrôle. Nous essaierons de savoir si le fait que ce soit la jambe dominante ou secondaire qui a été opérée joue un rôle dans les résultats. Et finalement nous analyserons si l'entraînement sensorimoteur réduit les asymétries entre les membres inférieurs, que ce soit chez les patients opérés ou chez les autres sujets observés.

2. Approche théorique

2.1. Anatomie et biomécanique du genou

L'articulation du genou est l'une des plus importantes de notre corps. Elle est en effet d'une grande utilité lors des déplacements, mais c'est surtout sur elle que repose une grande partie du poids du corps (Chassaing, 2013). Le genou est l'articulation intermédiaire du membre inférieur. Elle est composée de quatre os : le fémur, le tibia, le péroné et la rotule. Ces derniers constituent deux articulations : l'articulation fémorotibiale et l'articulation fémoropatellaire. La rotule, quant à elle, est maintenue en place par le tendon du quadriceps et le ligament rotulien. Son rôle essentiel est de permettre la flexion et l'extension (Faller, Sprumont et Schünke, 2006, p.154). Afin de pouvoir assurer ses fonctions complexes, le genou a la particularité de bouger selon 3 axes: la flexion-extension, l'adduction-abduction et la rotation interne-externe (Chabot et Fuentes, 2010). Ce sont les muscles de la jambe qui permettent de réaliser ces mouvements. Les principaux acteurs des mouvements sont les muscles ischio-cruraux pour la flexion, le muscle du quadriceps fémoral pour l'extension. Le biceps fémoral, quant à lui, assure la rotation externe et les semitendineux et semimembraneux sont là pour la rotation interne (Faller, Sprumont et Schünke, 2006, p.157).

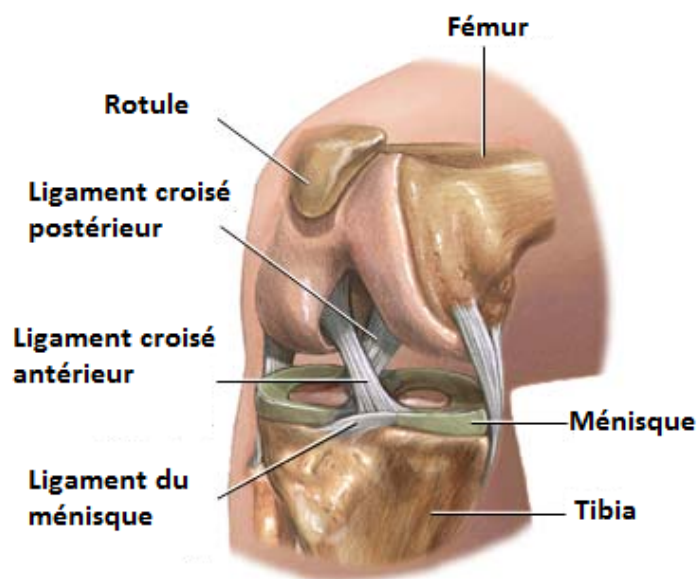


Fig. 1: Articulation du genou (droit)

Chacune des surfaces osseuses présente dans l'articulation (les condyles fémorales et le plateau tibial) est revêtue de cartilage. Il s'agit d'une couche élastique et lisse qui assure la fluidité du mouvement ainsi qu'une répartition adéquate des charges. Le genou possède une particularité : ses surfaces articulaires n'ont pas des formes complémentaires. En effet, l'extrémité inférieure du fémur (appelée condyles) est arrondie alors que le haut du tibia, le plateau tibial, est presque plat. C'est pour cette raison que les ménisques (interne et externe) vont combler ce vide et améliorer la congruence entre les os. Ceci permet d'augmenter la stabilité du genou et de distribuer les charges dans l'articulation de manière adéquate. De plus, les ménisques, ces petits coussinets en forme de croissant de lune composés de cartilage fibreux, agissent en tant qu'amortisseurs entre le fémur et le tibia (Chabot et Fuentes, 2010).

Le peu de congruence entre les os du genou et la nécessité d'un certain degré de mobilité contrôlée imposent la présence d'un système de stabilisation ligamentaire très développé. Les ligaments, constitués de tissu conjonctif très résistant, maintiennent en contact les différents os de l'articulation. Le genou possède quatre principaux ligaments. En périphérie, ce sont les ligaments collatéraux, interne et externe. Ils servent à maintenir la stabilité latérale du genou. Et au centre du genou, dans l'échancrure du fémur, ce sont les ligaments croisés, antérieur et postérieur. Ces ligaments maintiennent principalement l'articulation d'avant en arrière (Chabot et Fuentes, 2010).

L'articulation est entourée d'une capsule articulaire, une sorte de gaine fibreuse. Le cartilage qui recouvre les surfaces osseuses dans l'articulation leur permet de glisser sur les unes sur les autres. Ceci, associé au liquide synovial présent dans la capsule articulaire, rend les mouvements du genou fluides (André et al., 2008).

Les mouvements de flexion et d'extension, qui se font dans le plan sagittal, représentent le principal degré de liberté du genou. Le genou peut être fléchi de 120° à 140° avec un mouvement actif et jusqu'à 160° lors d'une flexion passive. L'extension est la position dite de référence, les têtes osseuses sont alignées. Le mouvement est alors une hyperextension qui peut avoir une amplitude de 0° à 10°, variable en fonction de la laxité de l'individu. Les rotations, interne et externe, se font

autour de l'axe longitudinal. Elles sont possibles uniquement lorsque le genou est fléchi. Le genou peut réaliser une rotation interne de 30° et une rotation externe de 40°. Dans le plan frontal finalement, l'articulation peut réaliser des mouvements de faible amplitude appelés adduction (carus) et abduction (valgus). Ces mouvements ne sont pas possibles si le genou est en position d'extension (Versier, 2014).

2.1.1. Le ligament croisé antérieur

Le ligament croisé antérieur s'insère sur le bord antérieur de l'aire intercondylienne et sur la partie postérieure de la face axiale du condyle externe. Il croise, au milieu du genou, le ligament croisé postérieur pour former le pivot central. Les ligaments croisés assurent la stabilité antéro-postérieure et permettent des mouvements de charnière tout en maintenant les surfaces en contact. Le ligament croisé postérieur est tendu lorsque l'articulation se trouve en flexion. Le ligament croisé antérieur, quant à lui, est tendu lorsque l'articulation se trouve en extension et sert donc de frein à l'hyperextension. Lors des mouvements de flexion-extension, les ligaments croisés sont responsables du rappel des condyles. Ils empêchent donc un trop grand déplacement vers l'avant du tibia par rapport au fémur. Lors de rotations internes, les ligaments croisés s'enroulent entre eux et bloquent rapidement la rotation interne. Ils ne freinent en revanche pas les rotations externes (Versier, 2014).

Le ligament croisé antérieur est torsadé et constitué de deux faisceaux : un brin antéromédial et un brin postérolatéral. Le premier est orienté de telle sorte qu'il bloque l'avancée du tibia et le second permet de limiter sa rotation. Des études anatomiques ont montré que la longueur du LCA varie entre 31 et 38 mm et entre 10 et 12 mm pour sa largeur. Finalement, il est important de relever que le ligament croisé antérieur est le plus exposé aux traumatismes (Kweon, Lederman, & Chhabra, 2013, p. 17).

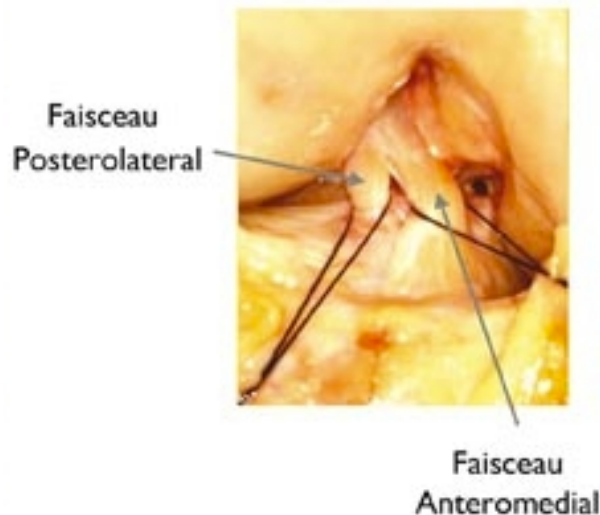


Fig. 2: Les deux brins du ligament croisé antérieur

2.2. Mécanismes de blessure et facteurs de risque

Dans leur étude, Kobayashi et al. (2010) ont classé les blessures impliquant une déchirure des ligaments croisés antérieurs selon quatre catégories. Le premier type de blessure est celui survenant sans contact et il représente plus de 60% des cas. Ce pourcentage est d'ailleurs confirmé par l'étude de Gianotti et al. (2009) qui parle d'une fréquence de 58%. De plus, il est important de relever que les blessures sans contact sont largement plus fréquentes chez les femmes. Elles représentent en effet plus de 70% des blessures du LCA chez les sujets féminins. Les autres types de situations pouvant impliquer des blessures au niveau du LCA sont les contacts, les collisions et les accidents.

Dans la littérature, trois principaux mouvements sont décrits pour expliquer une déchirure du LCA :

- 1) Alignement dynamique avec une position valgus du genou et une abduction du pied durant la phase de charge (Kobayashi et al., 2010), aussi décrit comme étant des blessures survenant lors d'atterrissages ou de freinages par Krosshaug et al. (2007)
- 2) Alignement dynamique avec une position varus du genou et une adduction du pied durant la phase de charge (Kobayashi et al., 2010), aussi décrit comme

mouvement de type « side step » provoquant une déchirure par Olsen et al. (2004)

- 3) Hyperextension durant la phase de charge (Kobayashi et al., 2010), aussi décrit comme mouvement postéro-antérieur sur le plan sagittal par Quatman et Hewett (2009) et par Yu et Garrett (2007)

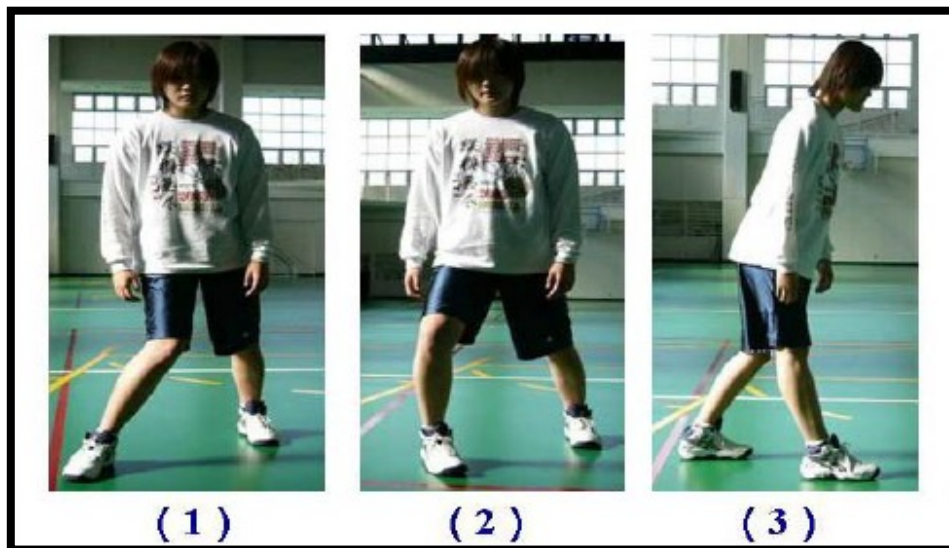


Fig. 3: Image tirée de l'étude de Kobayashi et al. (2010)

Différentes études ont décrit plusieurs facteurs de risque. Tout d'abord, les facteurs externes, tels que la météo, le type de sol, les chaussures ou le fait que les sportifs soient en situation de compétition ou d'entraînement peuvent avoir une influence sur les risques de blessure au niveau du ligament croisé antérieur (Hewett et al., 2009; Lambson, Barnhill, & Higgins, 1996; Myer, Ford, & Hewett, 2004; Olsen et al., 2003; Orchard et al., 2001). Les facteurs de risque internes suivants sont cités par Hewett et al. (2009) : le sexe, l'âge, de précédentes blessures au niveau du genou, le BMI et les facteurs anatomiques tels que l'angle Q, la longueur des jambes, la taille de l'espace intercondylaire et la laxité articulaire. Posthumus et al. (2009) avec leur étude sur le gène COL5A1, sont les premiers à avoir découvert qu'il existait un lien entre la génétique et le risque de rupture du LCA chez les femmes. McLean et Samorezov (2009) ont quant à eux découvert un lien de cause à effet entre la fatigue et ainsi donc une dégradation du système de contrôle central et une augmentation du risque de blessure du LCA. La fonction cognitive pourrait aussi être un facteur de risque. Selon l'étude de Swanik et al. (2007), les patients ayant subi une blessure du LCA montreraient des temps de réaction et d'analyse significativement plus lents que

le groupe contrôle, de même pour leur score sur la mémoire visuelle et verbale. Mais d'autres études sont nécessaires pour pouvoir affirmer que la neurocognition est effectivement un facteur de risque. Elliot et al. (2010) évoquent aussi l'aspect psychologique comme pouvant être un facteur de risque.

Il est important de relever que les hommes et les femmes ne sont pas égaux quant aux risques de blessure du LCA. Au niveau anatomique, les femmes ont un plus grand angle Q et un plus petit espace intercondyloire, ce qui augmente le risque de blessure. De plus, comme Chandrashekar, Slauterbeck, et Hashemi (2005) l'ont démontré dans leur étude, les femmes ont un ligament croisé antérieur plus étroit, ce qui peut augmenter les risques de déchirures. De plus elles ont, de manière générale, une plus grande laxité articulaire, ce qui augmente aussi les risques de blessures (McNair, Wood, & Marshall, 1992).

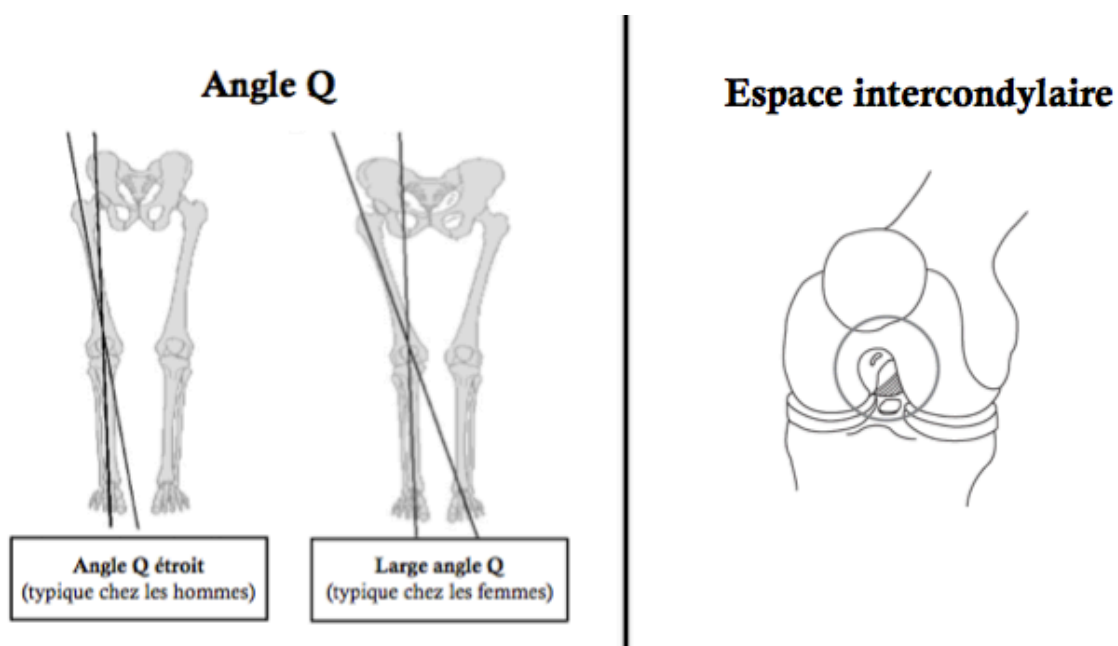


Fig. 4: Un grand angle Q et un faible espace intercondyloire sont des facteurs de blessure du LCA

D'un point de vue hormonal, des études ont montré une raideur musculo-tendineuse significativement plus faible durant l'ovulation et donc un taux de blessure plus élevé durant cette période (Bryant et al., 2008; Eiling et al., 2007). Finalement, Claiborne et al. (2006) ont découvert que les femmes avaient une force relative plus faible, plus spécifiquement au niveau des abducteurs de la hanche qui servent à la stabilisation, et que cela pouvait augmenter les risques de blessures du LCA.

2.3. Opérations du ligament croisé antérieur

Suite à une rupture du ligament croisé antérieur, deux solutions s'offrent généralement aux patients : une reconstruction chirurgicale du ligament qui est une méthode invasive ou un traitement conservateur visant à renforcer la musculature de la jambe dans le but de stabiliser l'articulation (Farshad et al., 2011). Mather et al. (2014) ont comparé les différences de coûts et d'efficacité entre une opération immédiate et une opération tardive précédée d'un traitement conservateur. Ils sont arrivés à la conclusion qu'une reconstruction immédiate était plus efficace et moins coûteuse qu'une reconstruction tardive, solution durant laquelle différents risques sont encourus.

Le choix d'opérer ou non un genou avec une rupture du ligament croisé antérieur reste cependant délicat et ne va pas de soi. Chalmers et al. (2014) se sont intéressés à cette question. Ils se sont focalisés, dans leurs observations à long terme, sur la stabilité du genou, les résultats fonctionnels, la nécessité d'une nouvelle opération et les résultats radiographiques d'une maladie dégénérative de l'articulation. Une faible incidence de nouvelles blessures chez les patients ayant subi une reconstruction chirurgicale, ainsi que l'amélioration de leur niveau d'activité ont été les seuls résultats concluants de leur recherche. Le choix de l'opération ou non se fera au cas par cas. Mais une lésion du LCA étant fréquemment associée à une lésion méniscale (65%) et cartilagineuse (40%) et comme ces lésions s'aggravent avec le temps, certains patients doivent absolument bénéficier d'une chirurgie réparatrice. L'opération est recommandée, que la rupture du LCA soit associée ou non à d'autres lésions, pour les sujets jeunes, sportifs, pratiquant des sports à pivot (Cazenave, 2013).

Les sujets qui ont participé à la présente étude, hormis le groupe contrôle, ont opté pour la solution invasive. Voici donc quelques informations concernant les différentes méthodes d'intervention. La suture du ligament croisé antérieur s'avérant souvent inefficace, ce dernier doit être remplacé par une greffe. Il est important d'utiliser un matériau qui permette d'obtenir un nouveau ligament avec des caractéristiques similaires à celui d'origine. On parle alors de ligamentoplastie. Trois types de greffes peuvent être utilisées pour remplacer le ligament lésé. Tout d'abord une greffe

synthétique, mais cette méthode n'est plus très utilisée car les risques de nouvelle rupture sont élevés. Ensuite, les autogreffes, qui sont prélevées sur le patient qui se fait opérer. Ces dernières peuvent être prélevées à différents endroits : DIDT (droit interne et demi-tendineux), tiers médian du tendon rotulien, fascia lata ou tendon quadricipital. Les autogreffes sont solides et sûres mais, en revanche, elles fragilisent le système musculaire. La dernière méthode est l'allogreffe, c'est-à-dire une greffe provenant d'un autre être humain. L'avantage de cette méthode est le fait que le patient opéré ne soit pas fragilisé par un prélèvement. Il semblerait par contre que leur solidité soit moindre que celle des autogreffes. C'est une méthode moins utilisée que l'autogreffe, dans la mesure où ces dernières sont plus fiables et moins coûteuses. Il reste cependant des indications pour les patients présentant une récurrence (Perraudin, 2014). Neuf des sujets de l'étude ont subi une autogreffe du tendon rotulien, sept une autogreffe de type DIDT et un sujet a subi une allogreffe.

Voici comment se déroule une ligamentoplastie. Tout d'abord, le chirurgien prélève le greffon qui prendra la place du ligament croisé antérieur lésé. Ensuite, il perce deux tunnels : l'un dans le tibia, au niveau de l'insertion ligamentaire de l'ancien ligament croisé antérieur et le second en bas du fémur, à l'endroit déterminé durant l'opération afin que la greffe ait la tension nécessaire pour permettre une bonne stabilité du genou. Le greffon est ensuite fixé par une vis au niveau du tunnel fémoral, puis on le tire jusqu'au deuxième tunnel, le tunnel tibial. Avant de le fixer de manière définitive avec une seconde vis, il est tendu avec précision pour assurer un bon maintien du genou dans toutes les positions. Finalement, le chirurgien fera si nécessaire le traitement des lésions des ménisques, du cartilage ou d'autres ligaments.

Si on observe de plus près le ligament croisé antérieur, on remarque qu'il est torsadé et constitué de deux faisceaux. Le premier est orienté de telle sorte qu'il bloque l'avancée du tibia et le second permet de limiter sa rotation. La finesse des techniques chirurgicales permet aujourd'hui de réaliser des ligamentoplasties à doubles faisceaux. Le prélèvement du DIDT comprenant deux tendons (droit interne et demi-tendineux) s'y prête parfaitement. Plusieurs années de recul et quelques recherches manquent cependant encore aux chercheurs pour savoir si ce type de reconstruction, plus anatomique, protège de manière plus efficace le genou de l'instabilité et de l'usure progressive (Lefèvre, Bohu et Herman, 2013). L'étude de

Keays et al. (2007) va cependant dans ce sens. Leur recherche propose une comparaison des résultats de performance pour une période de 6 ans entre des patients avec une greffe du tendon rotulien et des patients avec une greffe dite DIDT. Leur conclusion est que peu importe la greffe, les résultats sont satisfaisants dans les deux cas. Cependant, une reconstruction avec une greffe DIDT permet d'améliorer le rendement fonctionnel de l'articulation et une plus faible incidence de l'ostéoarthrite a été observée chez ces patients-là.

Les résultats de l'étude de Xie et al. (2014), qui a elle aussi permis de comparer les différentes greffes, révèlent peu de différences au niveau du retour à l'activité, des tests fonctionnels et de l'échec de la greffe. Cependant des résultats en faveur de la greffe DIDT ressortent car les patients ayant subi une greffe du tendon rotulien se plaignent de douleurs à l'avant du genou à cause de la cicatrice due au prélèvement du tendon. De plus, l'incidence de l'ostéoarthrite est significativement plus élevée dans le groupe avec une greffe du tendon rotulien.

2.4. Rééducation après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur

2.4.1. Rééducation à court terme

Selon Kalberer, Meyer, et Gojanovic (2013), il existe quatre phases de rééducation après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur. Pour pouvoir passer d'une phase à l'autre, différents critères doivent être remplis. La première phase est la phase de récupération post-opératoire (Post Operative Recovery). Elle consiste en un temps de repos accompagné de séances de physiothérapie visant à mobiliser le membre opéré et à améliorer la capacité à charger la structure blessée. De bons résultats au test de capacité de charge, comprenant des tests cliniques et fonctionnels permettent au patient de passer à la phase deux, appelée « Prepare To Train ». Cette phase a pour but de préparer l'athlète à l'entraînement. Les séances de physiothérapie sont là pour favoriser la reconstruction musculaire et ainsi permettre au sportif de récupérer les capacités qui lui permettront de s'entraîner sans

risque. Une seconde batterie de tests est réalisée. Elle vise à déterminer la capacité à s'entraîner. Des tests cliniques, fonctionnels, ainsi qu'une évaluation subjective sont réalisés. Un bon score permet au patient de passer à la phase suivante du processus de rééducation, la phase « Train To Perform ». Cette dernière a pour objectif de retourner de manière concrète au sport. Pour ce faire, les sportifs doivent récupérer leurs capacités de performance ainsi qu'une qualité de mouvement et ceci, grâce à un entraînement individuel pour ce qui est de la force, de l'endurance, de la vitesse et de la coordination. De plus, ils peuvent reprendre un entraînement léger, mais bien entendu sans contact. Pour pouvoir passer à la phase suivante, les athlètes doivent réussir le test de capacité de performance. Il est constitué de différents tests avec chacun des coefficients différents : un test clinique (10%), un test de force (35%), un test fonctionnel (35%), une évaluation subjective (10%) et une évaluation de la qualité du mouvement (10%). Les sportifs doivent obtenir un score supérieur minimum de 80 points sur 100. Si tel est le cas, ils entrent dans la dernière phase de rééducation, la phase « Train To Compete » qui doit à nouveau leur ouvrir les portes de la compétition. Cette phase doit permettre au patient de récupérer toutes ses capacités afin d'être à nouveau compétitif. Pour terminer la rééducation et avoir l'autorisation de pratiquer le sport comme avant leur blessure, les sportifs doivent atteindre au minimum un score de 90 points sur 100 au test de retour à la compétition. Ce dernier est identique à celui passé entre les deux phases précédentes.

Le test clinique (10%) comprend une appréciation de la douleur, évaluée à l'aide d'un questionnaire, une évaluation de l'épanchement au niveau de l'articulation opérée, enregistrée suite à une distance donnée de course à pied et finalement la mobilité du genou est testée en flexion et en extension. Le test de force (35%) calcule la force maximale isocinétique pour les fléchisseurs et les extenseurs du genou et ce, en chaîne ouverte avec une vitesse angulaire de 60°/sec. Il enregistre aussi la force explosive en chaîne fermée lors de Squat Jump, de Countermovement Jump et de sauts sur une jambe. Le test fonctionnel (35%) est composé de différentes formes de sauts et d'un test d'agilité comparant les résultats de la jambe opérée et de la jambe saine. Il mesure aussi la stabilité du genou lors d'un atterrissage sur une jambe. Un test d'équilibre sur une plateforme instable fait également partie de ce test fonctionnel. Pour l'évaluation subjective (10%), l'athlète doit remplir un questionnaire

l'interrogeant sur son ressenti lors de ses activités sportives afin de relever les éventuels symptômes ou problèmes survenant lors de l'entraînement spécifique au sport pratiqué. Finalement, l'évaluation de la qualité du mouvement (10%) analyse le contrôle qu'a l'athlète sur l'axe de sa jambe ainsi que la stabilité de l'articulation durant les exercices du test fonctionnel. La qualité du mouvement est notée sur une échelle de 1 à 10, selon des critères prédéterminés.



Fig. 5: Les 4 phases de rééducation après une opération du LCA, illustration tirée de l'étude de Kalberer, Meyer et Gojanovic (2013)

Ardern et al. (2011b) ont travaillé avec un échantillon de 503 patients. Ils ont relevé que, douze mois après l'opération, 33.4% étaient de retour à la compétition, 33.6% s'entraînaient à nouveau et prévoyaient un retour prochain à la compétition et 33% n'avaient pas retrouvé leur niveau pré-opératoire. Ils ont constaté que les hommes avaient de meilleures chances de retour au sport, tout comme les sportifs pratiquant une discipline saisonnière. De plus, un score supérieur à 85% de symétrie au niveau des membres inférieurs au Hop Test est un bon indicateur pour une possibilité de retour au niveau pré-opératoire. Ardern et al. (2011a), dans une autre recherche, ont constaté, sur un échantillon de 5770 patients que, trois ans et demi après une plastie ligamentaire du LCA, 82% des sujets pratiquaient à nouveau le sport, 63% disaient avoir retrouvé leur niveau pré-opératoire, mais seulement 44% étaient retournés à la compétition. Les raisons d'un non-retour au sport peuvent être les suivantes : peur d'une nouvelle blessure, mauvaise récupération de la fonction du genou ou changement de mode de vie.

Le risque de récurrence est plus élevé chez les jeunes sportifs, chez les athlètes pratiquant un sport dit à risque et chez les patients avec un retour rapide au sport. 50% des récurrences surviennent dans les 9 mois suivants l'intervention (Wright et al., 2011).

2.4.2. Rééducation à long terme

Les athlètes sont très entourés et suivis durant les premiers mois qui suivent une opération du LCA. De nombreuses données sont donc disponibles et beaucoup d'études sont réalisées sur le court terme. Il n'existe en revanche que peu de recherches sur la rééducation et la récupération à long terme. Tengman, Brax Olofsson, Nilsson, et al. (2014) ont remarqué que, 20 ans après l'intervention, les sujets opérés obtenaient un score de fonctionnalité du genou inférieur au groupe contrôle. De plus, leur jambe opérée était moins performante que leur jambe saine et ils ont obtenu de moins bons résultats que le groupe contrôle lors d'exercices de sauts. Les conséquences à long terme d'une rupture du LCA sur la force musculaire du membre inférieur ont été étudiées par Tengman, Brax Olofsson, Stensdotter, et al. (2014). La comparaison avec des sujets sains a permis de mettre en évidence un déficit de force musculaire du côté de la jambe blessée. 20 ans après l'opération, la

force maximale concentrique et excentrique des patients était environ 10% inférieure du côté de la jambe opérée. Les résultats de la jambe saine sont quant à eux identiques à ceux du groupe contrôle. Ceci nous indique donc qu'une blessure du LCA peut conduire à une réduction persistante de la force maximale du côté de la jambe blessée. Oiestad et al. (2010) ont décelé la présence d'ostéoarthrite chez près de la moitié des patients ayant subi une reconstruction du LCA durant les 10 à 15 ans suivant l'opération. Ils ont toutefois relevé que les sujets ayant des blessures dites combinées, c'est-à-dire avec des dommages supplémentaires au niveau des ménisques ou du cartilage étaient significativement plus touchés.

2.5. Répartition des charges au niveau des membres inférieurs

Comme Chmielewski (2011) l'a démontré dans son étude, la répartition des charges est déséquilibrée après une reconstruction chirurgicale du LCA. Généralement, on observe une réduction des charges du côté du membre opéré. Ces asymétries peuvent mener à de nouvelles blessures, c'est pourquoi il est important de rétablir un équilibre. Dans une autre étude, Chmielewski et al. (2002) ont constaté que la différence de charge était plus marquée directement après l'opération chez les patients ayant subi une reconstruction chirurgicale. Ceci s'explique par le fait qu'une phase de repos est imposée au sportif après l'intervention, ce qui entraîne une diminution de la masse musculaire. De plus, lors d'une plastie ligamentaire par greffe du tiers médian du tendon patellaire, la zone du prélèvement peut être source de douleurs et engendrer des difficultés durant la réadaptation. Il arrive que la répartition des charges reste symétrique chez certains sujets suite à l'opération. Mais la plupart du temps, dans ces cas-là, cette dernière est due à des compensations au niveau des hanches ou des chevilles, ce qui accroît le risque de nouvelles blessures (Chmielewski, 2011).

L'une des principales conséquences d'une répartition asymétrique des charges au niveau des membres inférieurs est une augmentation du risque de récurrence de blessure, que ce soit sur le membre opéré ou du côté sain. Hewett et al. (2005) ont constaté dans leur étude qu'une asymétrie sur le plan frontal est la cause d'une augmentation de risque de nouvelle blessure du LCA chez les athlètes féminines.

Chmielewski (2011) évoque, dans son étude, le développement d'ostéoarthrite (= arthrose) post-traumatique du genou comme étant une autre conséquence d'une asymétrie des charges. En effet, plus de la moitié des patients ayant subi une reconstruction du LCA souffrent de cette maladie dans les 10 à 15 ans suivant l'intervention (Oiestad et al., 2010). Il peut paraître paradoxal qu'une charge réduite sur le côté opéré provoque l'apparition d'ostéoarthrite post-traumatique étant donné que c'est habituellement une charge excessive au niveau des cartilages articulaires qui est la cause première de cette pathologie. Ceci s'explique par le fait que les charges réduites altèrent la synthèse des chondrocytes (cellules du cartilage) ainsi que l'activité catabolique en changeant la composition biochimique du cartilage articulaire et en le rendant structurellement plus faible (Arokoski et al., 2000; Carter et al., 2004). Une charge réduite affecte aussi la production des cytokines qui régulent l'activité des chondrocytes (Sun, 2010). Il est inquiétant de constater qu'une charge asymétrique puisse endommager le cartilage articulaire, d'où l'importance d'une rééquilibration rapide suite à une blessure ou à une intervention chirurgicale. Une fois le cartilage endommagé, une charge typiquement physiologique et habituellement bénéfique peut devenir nuisible. Une asymétrie des charges survenant dans les premières phases de réhabilitation suite à une reconstruction du LCA peut endommager le cartilage articulaire de telle sorte que les forces plus importantes subies dans les phases plus avancées de la réhabilitation sont nuisibles pour l'articulation (Chmielewski, 2011).

Evaluer et traiter une symétrie des charges dans les extrémités inférieures représente un challenge pour les cliniciens. Il n'est pas facile d'observer les forces en jeu. De plus, le matériel technique pour l'enregistrement des données (plateforme de force et système de capture du mouvement) est cher et nécessite des techniciens spécialisés pour le faire fonctionner. Un autre problème est le manque de données normatives provenant d'un groupe contrôle qui permettrait de déterminer clairement l'aspect pathologique d'une asymétrie. Il serait en effet intéressant de pouvoir comparer les résultats obtenus par les patients opérés avec ceux de sujets sains (Paterno et al., 2007).

La définition de la symétrie entre les membres est aussi un point important. L'indice de symétrie des membres se calcule grâce à l'équation suivante : [côté opéré/côté

non opéré] x 100. C'est une mesure clinique souvent utilisée pour quantifier l'asymétrie au niveau de la force du quadriceps ou dans des exercices tels que le Hop test par exemple. Une diminution de l'asymétrie peut résulter soit d'une augmentation des performances du côté opéré, d'une diminution des performances du côté non opéré ou d'une augmentation des deux côtés avec un gain relativement plus grand du côté opéré. Il est indispensable de déterminer le seuil d'asymétrie des charges afin de faciliter l'analyse et la prise de décision clinique. Notons quand même qu'une répartition totalement symétrique des charges est probablement irréaliste, et elle ne semble pas non plus exister chez les sujets sains (Chmielewski et al., 2002; Neitzel et al., 2002; Paterno et al., 2007). La question est donc de savoir quel est le niveau d'asymétrie acceptable, et si ce dernier varie selon les activités. Il n'existe pas de réel consensus concernant le niveau d'asymétrie acceptable au niveau de la force du quadriceps et pour les Hop tests afin de pouvoir débiter la réhabilitation avancée ou pour un retour au sport (Kvist, 2004). L'équipe de Barber et al. (1990) s'est tout de même penchée sur la question et, selon leurs recherches, un rapport de 85% ou plus entre les membres inférieurs peut être considéré comme étant cliniquement normal. Ils n'ont pas trouvé de valeurs significatives liées au type d'activité, au niveau, au genre ou au côté dominant. Ceci leur a permis de déterminer un indice global de symétrie pour l'ensemble de la population. Un indice de symétrie de 85% a été calculé lors de différents tests de sauts, et ce pour 90% de la population testée.

2.6. Entraînement d'équilibre et symétrie au niveau des membres inférieurs

Le problème d'asymétrie fonctionnelle a été le sujet de nombreuses et récentes recherches, que ce soit pour les sports de contact, de contact limité ou sans contact. La présence d'asymétrie au niveau de la force dans les membres inférieurs chez les jeunes athlètes pratiquant différentes disciplines sportive est considéré comme étant un facteur intrinsèque de risque de blessure (Sannicandro et al., 2014).

L'étude de Sannicandro et al. (2014) a permis de montrer qu'un entraînement d'équilibre avait la capacité de réduire les asymétries au niveau des membres inférieurs. Dans un premier temps, ils ont recherché la présence d'asymétries fonctionnelles au niveau des membres inférieurs chez de jeunes joueurs de tennis lors d'exercices de force et de rapidité. Puis, ils ont testé un programme d'entraînement d'équilibre spécifique, afin d'évaluer sa capacité à diminuer de manière significative ces asymétries. Pour quantifier le pourcentage d'asymétrie au niveau des membres inférieurs, avant et après l'entraînement, différents tests ont été réalisés : un one-leg hop test pour évaluer la force explosive et la stabilité sur le plan sagittal, un side-hop test pour la force et la stabilité sur le plan frontal ainsi qu'un side-step and forward 4.115 m test, pour mesurer la vitesse latérale. Les performances au sprint pour des distances de 10 et 20 m ainsi que lors du test de Foran ont aussi été mesurées, afin de quantifier l'accélération. Le groupe expérimental a réalisé un total de douze séances d'entraînements d'équilibre, deux séances de trente minutes d'entraînement par semaine et cela sur une période de six semaines. Ces séances comprenaient différents types d'exercices. Les résultats révèlent des différences significatives entre les pré- et post-test pour le groupe expérimental. Le degré d'asymétrie a été réduit suite au programme d'entraînement. Ces résultats confirment qu'un entraînement d'équilibre peut réduire le degré d'asymétrie au niveau des membres inférieurs.

Taylor (2011) a réalisé une étude sur l'entraînement d'équilibre avec perturbation pour les extrémités inférieures. Il explique que ce type d'entraînement permet d'améliorer la stabilisation grâce à l'efficacité des contractions musculaires. De plus les voies neurales s'en trouvent affinées, ce qui améliore les modes de recrutement musculaire ainsi que la stabilité dynamique des articulations. Associé à d'autres techniques d'entraînement neuromusculaire, l'entraînement d'équilibre avec perturbation est efficace dans le traitement péri-opératoire des ruptures du ligament croisé antérieur.

L'étude de Mandelbaum et al. (2005) visait à déterminer si un programme d'entraînement neuromusculaire et proprioceptif avait la capacité de diminuer les accidents impliquant les ligaments croisés antérieurs. Les résultats ont montré une

nette diminution des blessures au niveau du LCA pour les sujets ayant pris part à ce programme.

Cerulli et al. (2001) ont, quant à eux, mis sur pied un programme d'entraînement d'équilibre. Leur objectif était de réduire les risques de blessures au niveau du ligament croisé antérieur et les résultats qu'ils ont obtenus sont concluants. Un entraînement neuromusculaire (exercices pliométriques et techniques), associé à des exercices d'équilibre et de stabilité, permettrait de diminuer significativement les risques de blessures au niveau des genoux selon Hewett et al. (2009).

Ces dernières années, des exercices d'équilibre ont de plus en plus été introduits aux programmes d'entraînements des athlètes, dans le but de réduire les risques de blessure (Caraffa et al., 1996; Granacher et al., 2011; Olsen et al., 2004; Sannicandro et al., 2014). En effet, des exercices sur une surface instable demandent un bon contrôle au niveau du système neuromusculaire, afin d'assurer la stabilité de l'articulation impliquée dans la réalisation de l'exercice. De plus, un entraînement d'équilibre intensifie la proprioception en stimulant les propriocepteurs à donner des feedbacks pour le maintien de l'équilibre et la détection de la position du corps (Cug et al., 2012). Il a été démontré que des surfaces instables peuvent améliorer la coordination intermusculaire entre les muscles agonistes et antagonistes, permettant ainsi une amélioration du contrôle de la position des articulations et réduisant la raideur de l'articulation (Behm & Colado, 2012).

En conclusion, un entraînement d'équilibre visant à réduire les asymétries doit être considéré comme étant une stratégie de prévention des blessures et donc inclus au programme d'entraînement. Car l'asymétrie est un facteur de risque à long terme et elle limite les performances des sportifs.

2.7. Mesures de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité du genou

La présente étude comprend des tests de sauts, de force et d'équilibre ainsi qu'une analyse subjective de la stabilité du genou. Elle est inspirée de différentes études

précédemment menées sur le sujet, certaines étant évoquées dans la revue de Chmielewski (2011).

Tout d'abord Chmielewski et al. (2002) ont réalisé différents tests dans leur étude. L'objectif était de mesurer, à l'aide de plateformes de force, les différences de charge entre les deux jambes chez des patients ayant subi une blessure au niveau du ligament croisé antérieur. Le premier test enregistre la charge statique sur le genou, à différents degrés de flexion. Un second test mesure l'équilibre des sujets lorsqu'ils se tiennent sur une jambe. Le test suivant mesure la charge exercée sur les deux jambes lorsque les sujets se relèvent de la position assise et finalement le dernier test enregistre la répartition des charges lors de l'enjambement d'une marche.

Neitzel et al. (2002) ont, quant à eux, tenté de déterminer si les sujets ayant subi une reconstruction du ligament croisé antérieur chargeaient de manière symétrique leurs membres inférieurs lors de squats parallèles. Les sujets devaient réaliser des séries de 9 squats avec des degrés de flexion du genou de 30°, 60° et 90° et avec différents poids ajoutés. Pour leurs mesures, les chercheurs ont placé des capteurs dans les chaussures des participants afin d'enregistrer les charges exercées durant les exercices.

Une étude a aussi été réalisée par Holsgaard-Larsen et al. (2014) afin de calculer la force musculaire et les performances fonctionnelles des patients blessés au niveau du ligament croisé antérieur. Grâce à une analyse 3-D ils ont mesuré les asymétries entre les deux jambes. Leurs sujets ont dû effectuer des Countermovement Jump à une et à deux jambes, des sauts en longueur à une jambe et finalement un test de force maximale.

Padua et al. (2009) proposent un test appelé « Landing Error Scoring System ». C'est un outil qui identifie de manière fiable le risque d'un individu à être sujet à une rupture du ligament croisé antérieur. Un Drop Jump est filmé sur un plan frontal et sagittal. Le score de « Landing Error Scoring System » est établi lors de la rediffusion des extraits enregistrés grâce à une analyse cinétique et cinématique tridimensionnelle. Les sujets présentant un haut score ont une mauvaise technique d'atterrissage et ont donc de plus grands risques de se blesser. Finalement,

Granacher et al. (2011) ont réalisé une étude sur la force et l'équilibre chez les adolescents. Les sujets ont participé à des séances d'entraînement sur une durée de huit semaines. Pour mesurer les progrès des sujets, les tests suivants ont été réalisés : un test de force maximale isométrique, un test de développement de force, ainsi qu'un test de Countermovement Jump, tous trois mesurés grâce à des plateformes de force. De plus deux autres tests ont été réalisés pour mesurer le contrôle postural statique et dynamique des participants. Pour ce faire, des plateformes d'équilibre avec et sans perturbations ont été utilisées.

Les tests réalisés par ces différentes équipes ont inspiré les tests de notre recherche.

3. Méthode

3.1. Population de l'étude

Pour cette étude, nous avons sélectionné 27 sujets, hommes et femmes, en bonne santé, âgés de 18 à 40 ans. Ces derniers pratiquent un sport au moins une fois par semaine et prennent part à des activités physiques comprenant des sauts, de la course, des mouvements de pivot ainsi que des « stops and go ». Parmi les participants, 18 sujets (11 ♀ et 7 ♂) ont subi une blessure au niveau du LCA qui a mené à une chirurgie reconstructrice datant de plus de deux ans. Les sujets ne devaient pas avoir d'autres blessures pouvant, d'une manière ou d'une autre, influencer les résultats. Les 9 sujets restants (5 ♀ et 4 ♂) forment le groupe contrôle, ce sont des sujets sains, n'ayant aucune blessure susceptible d'influencer d'une quelconque manière les résultats des différents tests. Dans le groupe des participants opérés, 10 se sont blessés la jambe dominante et 7 la jambe secondaire. Le 18^e sujet n'a pas de préférence entre ses membres inférieurs, il n'est donc pas intéressant de comparer ses résultats à ceux des autres participants.

Les participants ont reçu toutes les informations nécessaires au bon déroulement de la recherche et ont pu poser leurs éventuelles questions. Ils ont signé un formulaire de consentement pour que la recherche se déroule en accord avec les règles d'éthique en vigueur.

3.2. Protocole de tests

Cette recherche a été réalisée en parallèle avec la recherche du travail de Master de Camille Muller, une autre étudiante de l'Université de Fribourg. Les différents tests ont été effectués de manière simultanée afin de réunir un plus grand nombre de sujets et surtout de leur éviter plusieurs rendez-vous au laboratoire. La procédure complète comprend des tests de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité. Le tout est réalisé trois fois, avec un court entraînement sensorimoteur entre les premières et deuxième mesures. Un exercice visant à une fatigue musculaire maximale du

quadriceps a été effectué entre le deuxième et le troisième test. Seules les deux premières mesures, soit la ligne de base et les mesures consécutives à l'entraînement sensorimoteur, seront traitées dans ce travail. Les résultats des troisièmes mesures n'étant pas utiles pour cette étude, ils ne seront donc pas thématiques.

Les sujets ont été recrutés au moyen de courriers électroniques d'invitation, grâce au contact direct, aux réseaux sociaux ou au bouche à oreille. Les personnes ayant répondu positivement à l'invitation ont reçu un lien Doodle pour inscrire leurs disponibilités afin de prendre part à la séance de tests ainsi qu'une note d'information¹ détaillée précisant ce qui les attendait. Ils ont ensuite été convoqués, par groupes de trois, pour la séance d'enregistrement des données d'une durée d'environ 2h30. A leur arrivée au laboratoire, ils reçoivent un rappel des informations de base concernant l'étude et ont la possibilité de poser toutes les questions nécessaires à leur compréhension des protocoles de tests et de la séance d'entraînement. Après quoi ils signent le document de consentement² et, après un court échauffement individuel, débutent la séance d'enregistrement. Les résultats obtenus aux différents tests sont enregistrés une première fois afin d'établir une ligne de base, puis les sujets suivent un entraînement sensorimoteur d'une demi-heure et sont à nouveau testés sur les mêmes exercices. Pour chaque participant, il y a une feuille protocolaire³ afin d'assurer un déroulement méthodique de la séance. A la fin de cette dernière, les sujets remplissent un questionnaire⁴ visant à récolter des données de base les concernant et répondent aux questions 5 à 8 tirées de l'étude de Coren (1993, p. 3) afin de déterminer de manière scientifique quelle est leur jambe dominante.

Les résultats obtenus aux différents tests ont été enregistrés grâce au logiciel Imago Record. Ils ont ensuite été exportés dans un document Excel et finalement analysés au moyen du logiciel SPSS. L'analyse statistique a été utilisée afin de mettre en évidence, de manière scientifique, les éventuelles modifications de performances suite à l'entraînement sensorimoteur.

¹ Cf. annexe 1

² Cf. annexe 2

³ Cf. annexe 3

⁴ Cf. annexe 4

Les prochains points sont consacrés à la description détaillée des différents tests et appareils utilisés pour cette recherche, ainsi qu'à une explication de l'entraînement sensorimoteur qui a été réalisé.

3.3 Tests

Afin de comparer la répartition des charges au niveau des extrémités inférieures, différents tests ont été mis sur pied : des tests de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité. Ils ont été réalisés une première fois pour la ligne de base, puis une seconde fois suite à l'entraînement sensorimoteur dans le but de mesurer les éventuels effets de ce dernier.

3.3.1. Tests de sauts

Les sujets effectuent trois différents tests de sauts : des Drop Jumps, des Landings et des Countermovement Jumps. Pour les deux premiers, les participants sautent à partir d'un élément en bois d'une hauteur de 40 cm, le troisième se fait à même le sol. Deux plateformes de force sont utilisées pour les mesures.

A) Drop Jump (= DJ)

Le Drop Jump est un saut vers le bas depuis une hauteur donnée suivi d'un saut « rebond ». Il permet d'évaluer la force réactive pliométrique, et plus précisément la puissance explosive du mollet (cycle étirement-détente) (Weineck, 1997, pp. 242-243). Au départ de l'exercice, les participants sont debout sur l'élément en bois, puis ils s'élancent en contrebas pour rebondir aussi vite que possible.

Lors du rebond, chaque pied doit se trouver sur sa propre plateforme. Les participants doivent penser à rebondir le plus haut et le plus rapidement possible car le temps de contact au sol doit être le plus court possible. L'exercice est réalisé à

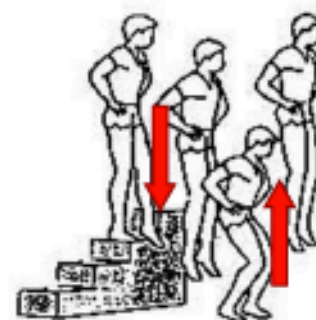


Fig. 6: Drop Jump

trois reprises. Le logiciel enregistre le pic de force maximale subi par chacune des plateformes lors du rebond et de l'atterrissage.

B) Landings

Au départ de l'exercice, les sujets sont debout sur un élément en bois haut de 40 cm. Puis ils s'élancent en contrebas pour atterrir avec un pied sur chaque plateforme de force. L'atterrissage doit être contrôlé et amorti de façon à éviter les blessures. L'exercice est répété à trois reprises. Le pic de force maximale subi par chaque plateforme lors de l'atterrissage est enregistré par le logiciel.

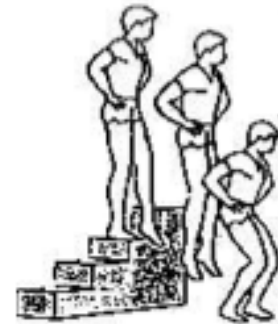


Fig. 7 : Landing

C) Countermovement Jump (= CMJ)

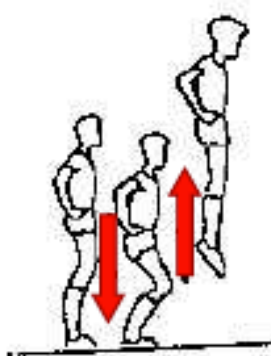


Fig. 8: Counter-movement Jump

Le CMJ est un saut avec mouvement d'élan. Il permet de déterminer la force explosive des membres inférieurs. Il s'agit, tout comme dans le DJ d'un travail pliométrique (Weineck, 1997, p. 242). Le sujet testé doit avoir une position de départ avec les genoux fléchis à 90°, les jambes écartées à hauteur de hanche, le dos droit et les mains sur les hanches. Il doit effectuer un saut vertical le plus élevé possible, avec une flexion des genoux préalable à l'extension. Comme dans les tests précédents, l'exercice est

répété trois fois et chaque pied est disposé sur une plateforme de force, de sorte que le logiciel puisse enregistrer les données de chacune des jambes.

3.3.2. Tests de force

L'objectif des tests de force est de mettre en évidence les éventuelles différences de force entre les deux membres inférieurs. La force maximale ainsi que la force explosive sont mesurées au moyen d'un appareil de fitness appelé Multipower ainsi qu'à deux plateformes de force. Les sujets effectuent trois tests différents :

A) Squats avec barre de 7.5 kg et squats avec 70% du poids du corps ajouté

Ces deux tests servent à mesurer la force explosive des sujets. Ils sont réalisés une fois uniquement avec la barre qui pèse 7.5 kg, puis avec 70% du poids du corps du sujet ajouté. Pour ces tests-là, les sujets n'ont pas besoin de répéter l'exercice étant donné que la série compte une vingtaine de squats et propose donc suffisamment de données pour l'analyse. Pour les séries de squats, les participants se tiennent debout, un pied sur chaque plateforme, la barre posée sur les épaules. Ils doivent réaliser les mouvements de flexion-extension en suivant le rythme donné (fréquence = 0.8 sec) par un programme informatique. Les plateformes de force enregistrent les variations de charge de chaque jambe sous forme de pics de force et ce, durant l'intégralité de la série.

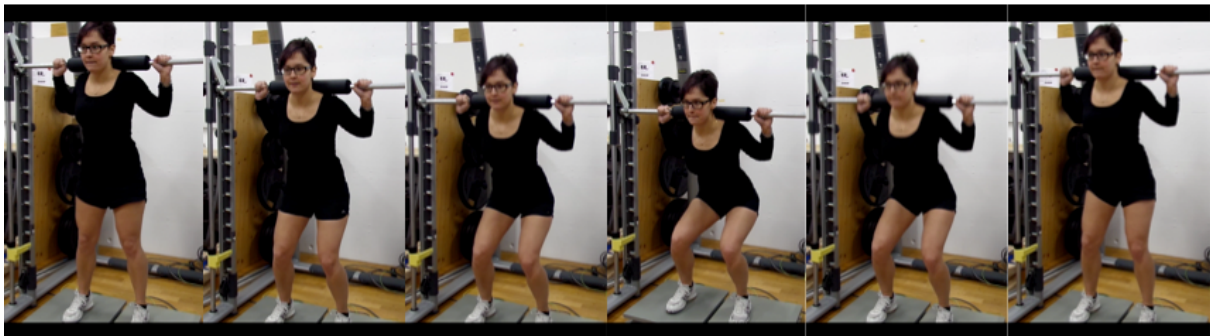


Fig. 9: Squats

B) Force maximale

Durant ce test, les sujets exercent leur force maximale en position de squat sur une barre bloquée à une hauteur adaptée. Au départ, ils sont en position debout, les jambes mi-fléchies, les épaules appuyées contre la barre. Lorsque le signal sonore retentit, ils doivent pousser progressivement la barre comme s'ils voulaient la soulever, jusqu'à déployer leur force maximale. Afin d'éviter des blessures, il est très important de bien contracter la musculature abdominale et dorsale durant toute la durée de l'exercice. L'exercice est répété à trois reprises. Les plateformes de force enregistrent les données, soit la poussée verticale des jambes vers le bas qui représente la force maximale exercée par les membres inférieurs durant l'exercice.

3.3.3. Test d'équilibre

L'équilibre des sujets est mesuré grâce à la plateforme suspendue Posturomed. Cette dernière enregistre les déplacements du centre de gravité. L'exercice est réalisé avec une perturbation. Les sujets ont tout d'abord la possibilité d'essayer deux fois la plateforme afin d'éliminer l'effet de surprise. Les participants se placent sur la machine, sur une jambe légèrement fléchie, les mains sur les hanches et le regard fixé vers l'avant. Leur objectif est, dès l'apparition de la perturbation, de stabiliser aussi rapidement que possible la plaque. Trois essais sont enregistrés par jambe. Les variables calculées par le Posturomed sont les moyennes des déviations par rapport à l'axe X et à l'axe des Y.



Fig. 10:
Posturomed

3.3.4 Test de stabilité

Une analyse subjective de la stabilité du genou est réalisée. Pour ce faire, les participants sautent verticalement, le plus haut possible, en donnant une impulsion à deux jambes et atterrissent sur une jambe. Les sauts s'effectuent les mains sur les hanches et les participants tiennent quelques secondes la position d'atterrissage. Afin de noter les sauts, l'examineur se place en face des sujets, le regard fixé sur leur genou. Il attribue une note à la stabilité du genou au moment de l'atterrissage. Les sauts sont notés avec un 3 si l'on observe une très bonne stabilité de l'articulation du genou, avec un 2 si un léger déséquilibre survient durant la phase de stabilisation et avec un 1 si un gros déséquilibre et donc une instabilité flagrante de l'articulation apparaît.



Fig. 11: Test de stabilité

3.4. Entraînement sensorimoteur

L'entraînement d'équilibre dure 30 minutes. Il a été réalisé entre la première et la seconde série de tests. De nombreuses pauses ont été introduites afin d'éviter les effets que pourrait avoir la fatigue sur les deuxième mesures. Les sujets réalisent une série de 5 répétitions (30 sec d'exercice/30 sec de pause) à un même poste, puis ils passent au poste suivant. Le circuit comprend six postes différents illustrés ci-dessous. Un Timer a été utilisé afin de calculer, de manière simple et précise, le temps de travail.



Fig. 12: Illustration des 6 postes de l'entraînement sensorimoteur

Certains sujets ayant déjà un bon niveau d'équilibre, ils ont la possibilité d'augmenter la difficulté de l'exercice en y ajoutant des exercices de coordination avec des balles de jonglage par exemple.

3.5. Formation des groupes

Afin de pouvoir comparer et analyser les résultats obtenus durant la séance de tests, nous avons dû répartir nos sujets dans différents groupes. Notre première idée était de séparer les sujets opérés en deux groupes, selon qu'ils aient été blessés du côté gauche ou droit. Cependant, cette méthode n'est pas optimale car elle ne prend pas

en compte les différences liées à la jambe d'appui qui peut varier d'un participant à l'autre. Nous voulions ensuite prendre en compte la jambe d'appui pour définir les groupes, cependant, aucun test standardisé servant à déterminer la jambe d'appui n'existe dans la littérature scientifique. Nous nous sommes donc référés à l'étude de Coren (1993, p. 3) qui traite de la préférence latérale. Grâce à un formulaire en 16 questions, il est possible de déterminer la préférence latérale pour l'agilité des mains, des pieds, des yeux et des oreilles. Pour notre étude, nous avons sélectionné uniquement les questions relatives aux pieds :

5. With which foot would you kick a ball to hit a target?	<input type="checkbox"/> Left <input type="checkbox"/> Right <input type="checkbox"/> Either
6. If you wanted to pick up a pebble with your toes, which foot would you use?	<input type="checkbox"/> Left <input type="checkbox"/> Right <input type="checkbox"/> Either
7. Which foot would you use to step on a bug?	<input type="checkbox"/> Left <input type="checkbox"/> Right <input type="checkbox"/> Either
8. If you had to step up onto a chair, which foot would you place on the chair first?	<input type="checkbox"/> Left <input type="checkbox"/> Right <input type="checkbox"/> Either

Fig. 13: Questions tirées de l'étude de Coren (1993)

Pour analyser le questionnaire, un point positif est attribué lorsque le côté droit est choisi et un point négatif lorsque c'est le côté gauche qui est préféré. Si le sujet n'a pas de préférence, il n'obtient aucun point pour la question. L'addition des points permet d'obtenir un score qui nous indiquera la préférence latérale du sujet. On qualifie de complètement droitier un sujet ayant obtenu un score de +4. Pour les scores entre +1 et +3, on parle de plutôt droitier. Un sujet est complètement gaucher s'il obtient un score de -4 et plutôt gaucher pour un score compris entre -1 et -3. Un score de 0 indique qu'il n'y a pas de préférence latérale et le sujet est donc considéré comme étant ambidextre.

Nous avons donc posé les 4 questions ci-dessus aux sujets, ce qui nous a permis de déterminer leur préférence latérale. Ces données nous ont permis de répartir nos sujets en trois groupes :

- Opéré jambe dominante (10 sujets)
- Opéré jambe secondaire (7 sujets)
- Groupe contrôle (9)

3.6. Traitement et analyse statistique des données

Les résultats sont enregistrés grâce au programme informatique Imago Record, relié aux deux plateformes. Les données sont ensuite exportées vers des fichiers Excel, programme qui permet de calculer rapidement et simplement les moyennes et écarts-types. Ensuite, pour l'analyse statistique des valeurs, c'est le programme SPSS qui a été utilisé. Celui-ci permet de mettre en évidence les différences significatives de résultats entre la première et la seconde série de mesures ainsi qu'entre les groupes de participants. C'est l'analyse de variance ANOVA qui a été choisie pour évaluer les résultats obtenus. Il existe quatre conditions d'application avant de pouvoir effectuer une analyse de variance : indépendance des échantillons, normalité de la distribution, homogénéité des variances, variable dépendante numérique. L'ANOVA est utilisée pour comparer les moyennes des résultats obtenus par les différents groupes afin de mettre en relation les tests réalisés, l'effet de l'entraînement sensorimoteur, la jambe opérée ou non ainsi que la jambe dominante ou non. Dans une analyse de variance ANOVA, c'est la valeur P (= significativité) qui détermine si la différence de moyenne entre les groupes est significative ou non. On parle de différence significative lorsque la valeur P est inférieure à 5% ($P < 0.05$). Une telle valeur indique que les différences sont suffisamment grandes et que les valeurs peuvent donc être utilisées statistiquement.

4. Résultats

Tous les résultats et graphiques des différents tests réalisés durant cette étude sont visibles dans l'annexe 5. Seuls les résultats qui seront évoqués dans la discussion au point 5 vont être présentés dans ce chapitre.

Afin d'identifier les différences potentielles entre les mesures de la ligne de base et les mesures enregistrées après le court entraînement sensorimoteur ainsi qu'entre les différents groupes, plusieurs analyses de variance ont été réalisées pour chaque paramètre : charges sur les deux jambes lors des tests de Drop Jump, Landings et Countermovement Jump, lors des tests de squats avec 7.5 kg, de squats avec 70% du poids du corps et de force max, et lors des tests d'équilibre. Les changements de performance lors de ces tests ont été analysés grâce à une analyse de variance répétée ANOVA avec les facteurs intra-sujet de tests (test de Drop Jump, test de Landings, test de Countermovement Jump, test de squat avec 7.5 kg, test de squat avec 70% du poids du corps, test de force max et test d'équilibre), de temps (ligne de base et post-training), et de jambe (jambe opérée et jambe non opérée) et le facteur inter-sujet groupe (jambe dominante opérée, jambe secondaire opérée et groupe contrôle) [7 (tests) x 2 (temps) x 2 (jambes)]. Les différences entre les moyennes obtenues lors des différents tests ont été analysées avec une ANOVA répétée avec les facteurs de tests, de temps, de jambe et de groupe. Si la valeur de significativité P est inférieure à 0.05 ($P < 0.05$), on peut alors déduire que l'effet d'interaction est statistiquement intéressant.

Notons encore que le test de la stabilité du genou, étant une évaluation subjective et donc trop peu scientifique, et n'apportant aucune information intéressante à cette étude, il a été mis de côté lors de l'analyse de variance. Les résultats figurent tout de même dans l'annexe 5.

Une analyse de variance a tout d'abord été effectuée sur les moyennes des tests de sauts, de force et d'équilibre ensemble, pour les trois groupes. Les résultats de l'ANOVA concernant l'effet test donne les résultats suivants : (test effect : $F_{6;12} = 221.741$; $p < 0.001$). Ce résultat est cohérent car les valeurs des moyennes des tests

sont très différentes entre elles. Une autre valeur significative est l'effet d'interaction test*leg : (test*leg effect : $F_{6;12} = 3.163$; $p=0.006$). On peut donc affirmer qu'il existe une différence de charges entre les jambes durant les différents tests. Pour illustrer cela, voici le graphique du test de CMJ où l'on n'observe que très peu de différence de charge entre les deux jambes et le graphique des atterrissages, où la différence entre les deux jambes est importante.

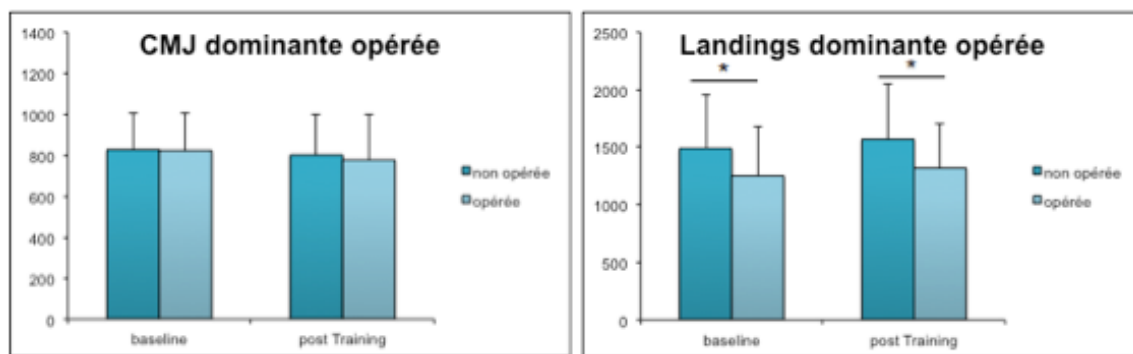


Fig. 14: Comparaison de la différence des charges entre les deux jambes pour le test de CMJ et pour le test d'atterrissage

Finalement les dernières valeurs significatives que nous donne cette analyse ANOVA sont celles concernant l'effet d'interaction test*leg*group : (test*leg*group effect : $F_{12;132} = 2.135$; $p=0.019$). Ceci nous indique qu'il existe une différence de charges significative entre les jambes durant les différents tests selon les groupes. Aucun effet temps n'est visible dans l'analyse ANOVA, ce qui nous aurait permis d'affirmer que l'entraînement sensorimoteur avait un effet sur les résultats. La valeur obtenue est de : (time effect : $F_{1;2}=3.163$; $P=0.089$). Elle n'est donc pas significative.

Différentes analyses de variance ont été réalisées avec différents groupes dans le but de trouver un effet temps, voici les valeurs obtenues :

- tous les sujets opérés comparés au groupe contrôle : (time effect : $F_{1;1} = 3.956$; $p=0.059$)
- les sujets ayant la jambe dominante opérée comparés aux sujets ayant la jambe secondaire opérée : (time effect : $F_{1;1} = 0.568$; $p = 0.463$)
- les sujets ayant la jambe dominante opérée comparés au groupe contrôle : (time effect : $F_{1;1} = 2.207$; $p = 0.157$)

On observe une valeur presque significative dans le premier exemple, mais cette dernière n'étant pas inférieure à $P<0.005$ on ne peut pas en tenir compte.

Une analyse de variance a alors été réalisée pour chacun des tests en comparant les trois groupes, afin de voir si des effets, mais principalement un effet temps, apparaissaient. Voici les résultats qui découlent de cette analyse.

Drop Jump

Aucun effet temps (time effect : $F_{1;2} = 0.137$; $p=0.714$) significatif ne ressort pour les tests d'atterrissage. Aucun autre effet significatif non plus n'a été calculé.

Landings

Aucun effet temps (time effect : $F_{1;2} = 2.257$; $p=0.147$) significatif ne ressort de l'analyse pour ce qui est des tests d'atterrissage. En revanche, on obtient un net effet de jambe : (leg effect : $F_{1;2} = 5.509$; $p=0.028$). Ceci nous indique que les charges exercées sur les deux jambes sont significativement différentes. On constate en effet, en observant les graphiques ci-dessous, et plus spécialement encore la ligne de base, que les sujets opérés chargent moins leur jambe blessée, que cette dernière soit dominante ou non. Les valeurs obtenues au t-test sont de $P<0.0185$ pour le rapport entre les moyennes des deux jambes pour le groupe ayant la jambe dominante opérée et de $P<0.05$ pour le groupe avec la jambe secondaire opérée, ce qui nous prouve que ces données sont statistiquement intéressantes.

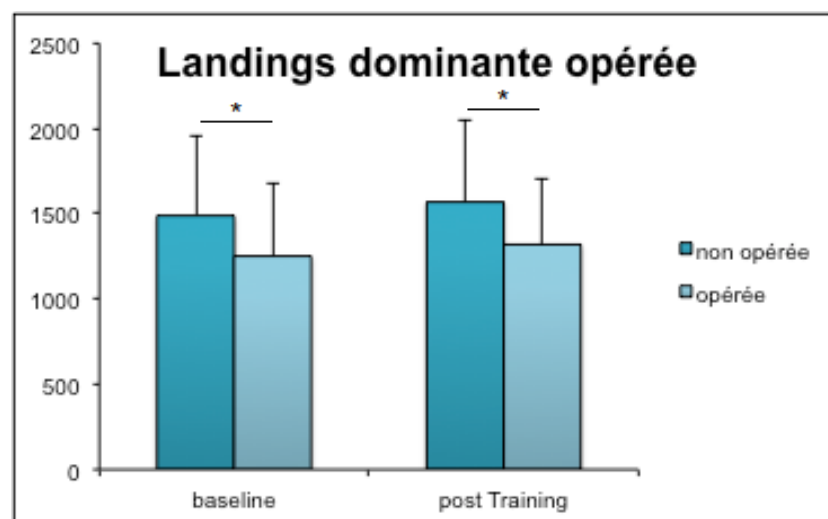


Fig. 15: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des atterrissages pour le groupe opéré à la jambe dominante

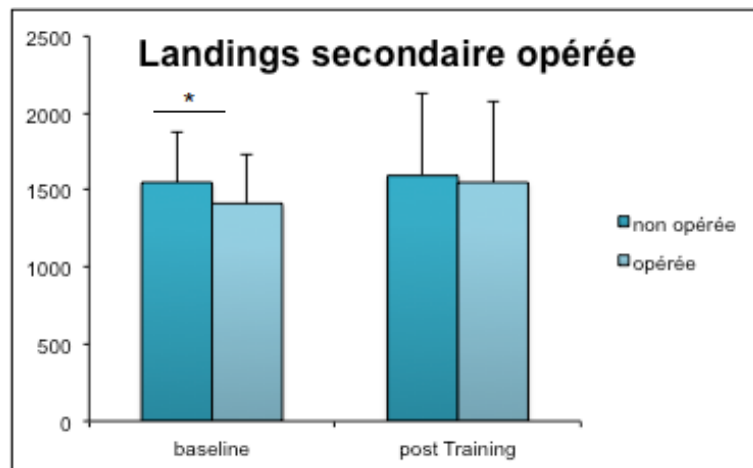


Fig. 16: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des atterrissage pour le groupe opéré à la jambe secondaire

Countermovement Jump

Pour les CMJ, on obtient un effet temps significatif : (time effect : $F_{1;2} = 8.735$; $p=0.007$). Ceci nous indique que les résultats sont significativement différents entre le pré-test et le post-test.

Une ANOVA a aussi été réalisée après avoir séparé les sujets entre opérés et non opérés. Un effet temps significatif a été calculé : (time effect : $F_{1;1} = 14.432$; $p=0.001$), ainsi qu'un effet d'interaction time*group : (time*group effect : $F_{1;24} = 6.74$; $p=0.016$). Ceci nous indique que l'entraînement a un effet différent sur les deux groupes. Voici donc deux graphiques qui illustrent cela. On remarque que le groupe des sujets opérés a obtenu des valeurs moins élevées que le groupe contrôle. De plus, la différence entre la ligne de base et le post-test est plus grande chez le groupe contrôle.

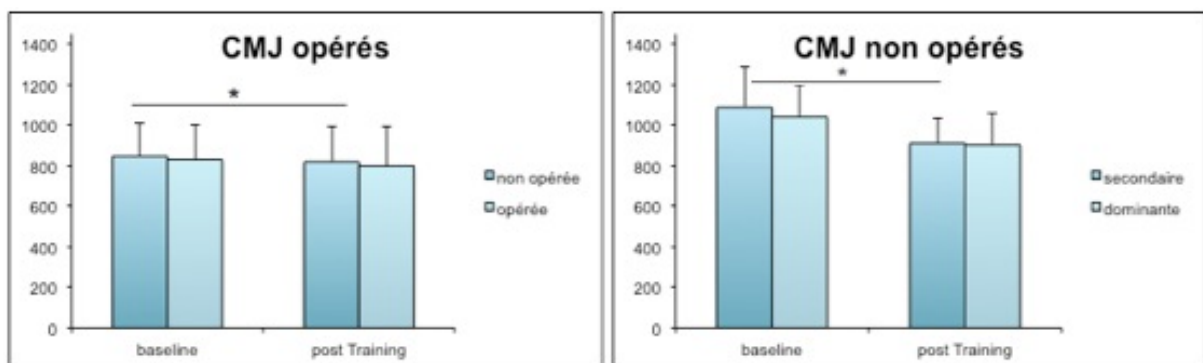


Fig. 17: Comparaison des moyennes des valeurs obtenues lors des tests de CMJ pour le groupe des sujets opérés et le groupe contrôle

Squats avec barre de 7.5 kg

Pour les squats avec une barre de 7.5 kg, on obtient un effet temps significatif : (time effect : $F_{1;2} = 6.566$; $p=0.017$). Ceci nous indique que l'entraînement a un effet sur les résultats.

Squats avec 70% du poids du corps

Pour les squats avec une barre de 7.5 kg, on obtient un effet temps significatif : (time effect : $F_{1;2} = 22.184$; $p<0.001$). Ceci nous indique que l'entraînement a un effet sur les résultats. Un effet d'interaction time*leg a aussi été calculé : (time*leg effect : $F_{1;2} = 5.585$; $p=0.027$). Ceci nous indique que l'entraînement a un effet différent sur les deux jambes. En observant les graphiques ci-dessous, on constate que, et pour le groupe avec la jambe dominante opérée et pour le groupe avec la jambe secondaire opérée, il y a un rapport significatif entre les moyennes obtenues lors de la baseline et lors du post-test ($P<0.001$ pour le rapport entre les moyennes des mesures de la baseline et du post-test pour le groupe jambe dominante opérée et $P=0.01$ pour le groupe avec la jambe secondaire opérée). De plus, la différence des résultats entre les deux jambes obtenus par le groupe ayant la jambe dominante opérée est significativement plus élevée lors du pré-test ($P=0.005$), ce qui n'est pas le cas pour l'autre groupe.

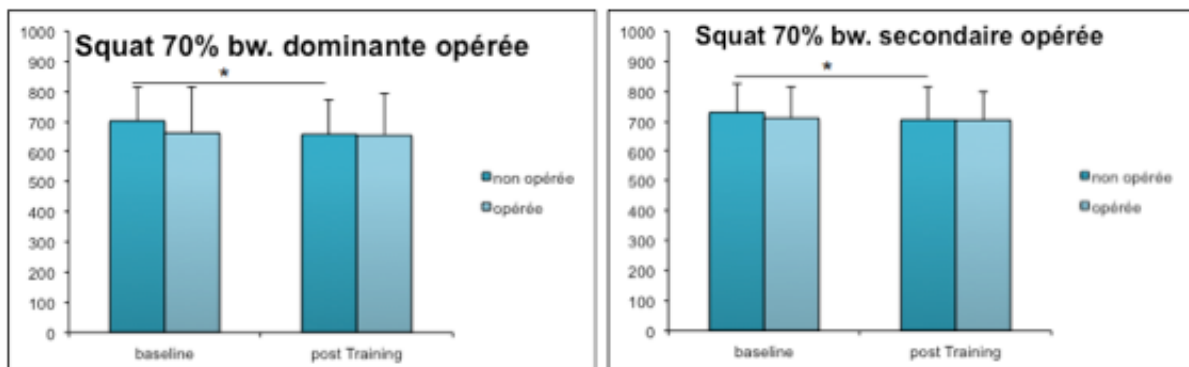


Fig. 18: Comparaison des moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors de squats pour les deux groupes de sujets opérés

Force max

Aucun résultat significatif ne ressort de l'analyse de variance pour le test de force max. En observant les graphiques de la page suivante, malgré que les résultats ne soient pas significatifs, on remarque que les sujets opérés chargent plus leur jambe opérée, ce qui peut paraître contraire l'hypothèse de base qu'on aurait pu formuler.

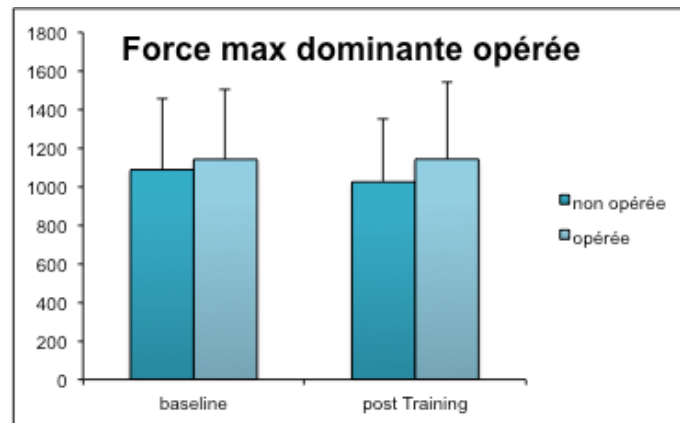


Fig. 19: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des tests de force max pour le groupe jambe dominante

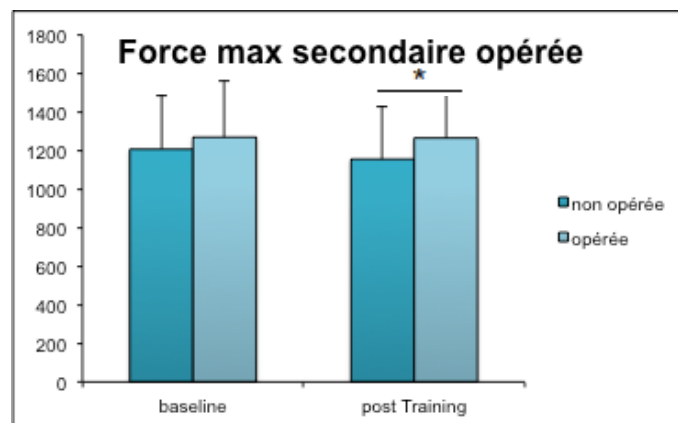


Fig. 20: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des tests de force max pour le groupe jambe secondaire opérée

Posturomed

Les résultats les plus concluants et les plus intéressants sont ceux obtenus lors des mesures d'équilibre. Tout d'abord l'effet temps nous indique que l'entraînement a un effet sur les résultats : (time effect : $F_{1;2} = 16.642$; $p < 0.001$). L'effet d'interaction time*group est aussi significatif : (time*group effect : $F_{2;23} = 3.912$; $p = 0.034$). Ceci nous indique que les effets de l'entraînement agissent différemment sur les trois groupes. Finalement nous obtenons un effet d'interaction time*leg*group (time*leg*group effect : $F_{2;23} = 11.108$; $p < 0.001$). Ce qui nous indique que l'entraînement a un effet différent sur les jambes selon les groupes. En observant les graphiques ci-dessous, on constate une amélioration significative entre le pré-test qui nous a permis de déterminer la ligne de base et les valeurs enregistrées « post training », et ce pour les deux jambes et pour les deux groupes. De plus, ces

données peuvent être discutées scientifiquement car les valeurs P obtenues au t-test sont de $P < 0.041$ pour les rapports des moyennes obtenues par la jambe saine et de $P < 0.003$ pour la jambe opérée pour le groupe ayant été opéré à la jambe dominante. Quant au groupe qui a été opéré à la jambe secondaire, la valeur P obtenue est de $P < 0.02$ pour le rapport des moyennes entre le pré-test et le post-test pour la jambe non opérée. Contrairement au groupe avec la jambe dominante opérée, le groupe avec la jambe secondaire opérée ne montre pas d'amélioration des résultats du côté de sa jambe opérée. On ne relève donc pas de valeur significative pour ce rapport, la valeur P du t-test est en effet de $P < 0.29$.

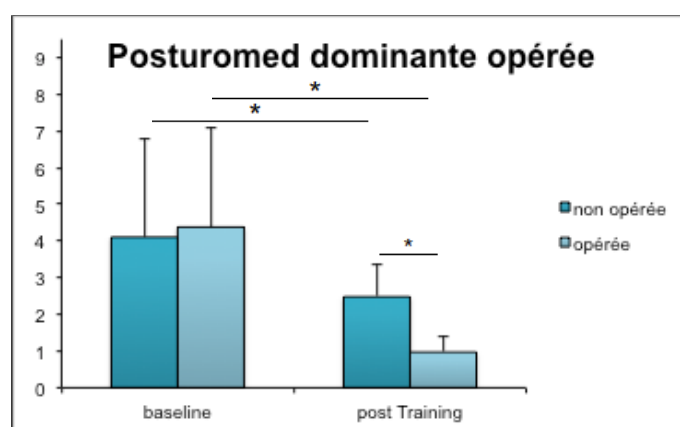


Fig. 21: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour le groupe jambe dominante opérée

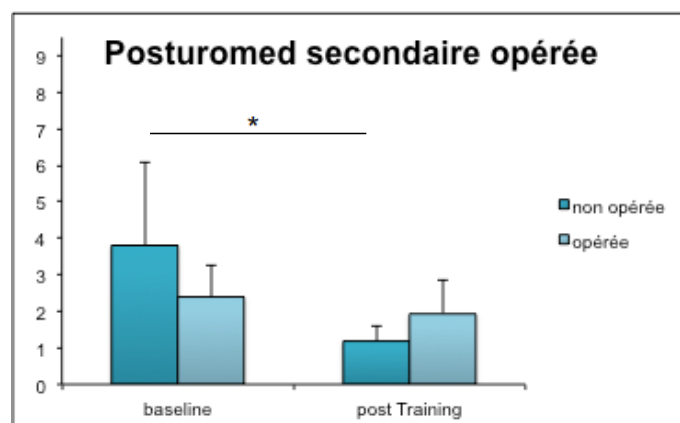


Fig. 22: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour le groupe jambe secondaire opérée

Les valeurs du groupe contrôle ne se comportent pas du tout comme celles des deux groupes de sujets opérés. En effet, les résultats sont significativement meilleurs lors du pré-test. En revanche, contrairement aux deux autres groupes, on ne constate pas d'amélioration, mais plutôt une régression.

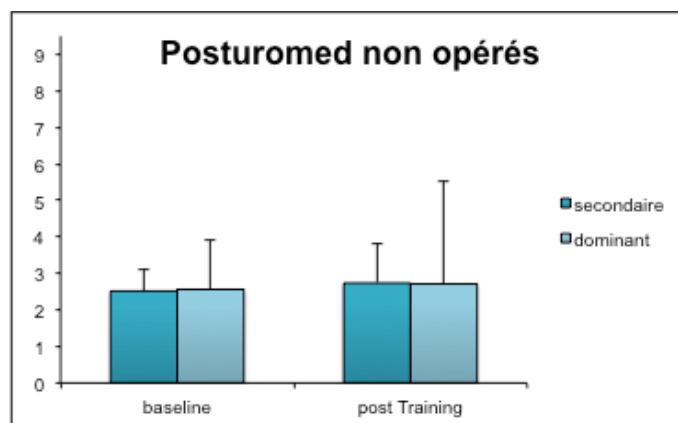


Fig. 23: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour le groupe contrôle

Les différences entre les deux jambes ont aussi été calculées pour chaque pré-test et comparées aux différences obtenues lors des post-tests, mais là non plus aucune donnée significative n'est à relever. Ceci nous aurait permis de dire que l'entraînement sensorimoteur a pour effet de réduire les asymétries entre les jambes. Voici cependant le graphique des atterrissages de l'un des participants. On remarque ici que, pour ce participant et pour cette série de test, l'entraînement sensorimoteur a eu l'effet escompté.

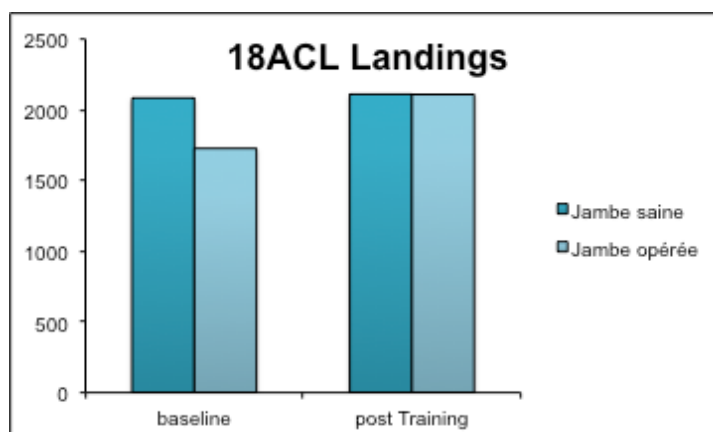


Fig. 24: Moyennes des trois essais réalisés par le sujet 18ACL lors du pré-test et du post-test de Landings

Indice de symétrie

Bien que les résultats du tableau ci-dessous n'aient pas de significativité statistique, ils demeurent intéressants. Les plages rouges indiquent les valeurs inférieures à ce qui est considéré comme normal : soit un indice de symétrie de 85% entre les membres inférieurs (Barber et al., 1990). Les valeurs en caractères gras indiquent une amélioration suite à l'entraînement d'équilibre. Les rapports dans la ligne « Améliorations » indiquent le nombre de participants qui se sont amélioré ou ont gardé un score stable suite à l'entraînement d'équilibre.

Tableau 1: Indices de symétrie obtenus par les sujets lors des différents tests

[%]	DJ 1	DJ2	Landings 1	Landings 2	CMJ 1	CMJ 2	Squat 1 70%	Squat 2 70%	Squat 1 7.5	Squat 2 7.5	Force max 1	Force max 2
Groupe dominante opérée	89	89	80	82	98	97	97	92	90	95	79	83
	70	100	81	77	100	93	83	95	89	96	71	75
	92	93	65	65	93	71	84	86	94	94	100	92
	97	97	99	99	92	88	91	93	83	93	84	65
	89	90	79	98	91	88	80	84	90	89	94	92
	70	69	61	70	96	98	95	95	93	81	88	100
	83	89	86	72	98	98	98	87	99	91	88	93
	88	97	96	93	87	86	77	91	92	96	89	96
	99	93	97	98	92	88	97	99	97	82	65	58
Groupe secondaire opéré	99	89	98	94	99	97	99	85	78	91	85	72
	83	90	85	93	100	96	99	98	98	92	84	80
	92	93	95	93	96	98	94	97	94	90	94	95
	98	88	89	89	97	99	87	83	88	91	100	99
	97	95	83	100	96	99	93	100	96	95	92	89
	82	86	99	98	93	94	93	96	98	94	87	99
	98	98	94	83	86	95	95	89	97	89	97	86
Groupe contrôle	92	99	81	91	95	96	93	89	96	95	82	80
	90	57	94	66	96	98	90	91	94	100	91	95
	92	87	100	74	99	93	86	83	88	87	88	95
	83	93	90	96	70	96	96	73	94	84	56	47
	83	91	87	96	85	77	98	93	75	100	89	-
	90	98	96	92	86	93	97	100	83	97	81	91
	91	90	73	60	96	98	93	99	94	100	100	89
	84	97	70	98	100	98	95	93	80	96	100	90
	90	94	78	88	92	93	89	87	75	91	61	89
Amélioration	82	96	98	90	95	99	98	99	97	98	97	99
	18/26		15/26		14/26		15/26		14/26		13/25	

5. Discussion

Le but de ce travail était de mettre en évidence les différences de charges au niveau des membres inférieurs chez des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur lors d'exercices de sauts (Drop Jump, Landings, CMJ), de force (Force max, Squats avec barre de 7.5 kg et Squats avec 70% du poids du corps ajouté), d'équilibre (évaluation subjective) et de stabilité (Posturomed). La recherche s'intéressait également à l'influence éventuelle d'un court entraînement sensorimoteur sur les performances lors des différents tests susmentionnés.

Concernant la répartition des charges, dès les premiers tests, les valeurs enregistrées par les plateformes de forces lors des exercices de sauts et de force, ont fait apparaître des différences entre les deux jambes. Cette observation a été faite chez les sujets opérés, mais aussi pour le groupe contrôle. Ce résultat était attendu car, comme le montrent Barber et al. (1990) dans leur étude, un indice de symétrie de 85% ou plus entre les membres inférieurs est considéré comme acceptable pour tout individu. En observant le tableau n° 1, illustrant les indices de symétrie obtenus par les sujets lors des différents tests, on constate qu'il y a beaucoup de rapports de symétrie insuffisants. En revanche, il est intéressant de constater qu'en moyenne 14 sujets sur 26 ont maintenu ou amélioré leur rapport de symétrie suite à l'entraînement. Ceci va dans le sens de l'étude de Sannicandro et al. (2014) qui a démontré qu'un entraînement d'équilibre permettait de diminuer les asymétries au niveau des membres inférieurs.

Il est intéressant de constater que la répartition des charges diffère d'un exercice à l'autre et selon les groupes. On constate tout d'abord une charge réduite du côté opéré dans les tests de landings, peu importe que la jambe soit dominante ou non. Ceci est d'ailleurs confirmé par les valeurs obtenues lors de l'analyse répétée de variance ANOVA car un effet leg significatif est observé : (leg effect : $F_{1;2} = 5.509$; $p=0.028$). Que ce soit l'équipe de Chmielewski et al. (2002) ou celle de Paterno et al. (2007), toutes deux ont observé des asymétries de charges lors d'atterrissages. Ce serait, selon elles, une manière de protéger l'articulation touchée. Des observations similaires peuvent se faire lors des Drop Jump pour les mêmes raisons. De plus,

pour les deux groupes opérés, on remarque une diminution de l'asymétrie, bien que non significative, entre la ligne de base et le post-test.

Une charge plus ou moins semblable est observable durant les séries de squats. Les différences entre les jambes tendent à diminuer pour le groupe secondaire opéré et le groupe contrôle pour les Squats avec une barre de 7.5 kg, alors que c'est le cas pour les deux groupes opérés pour les Squats avec 70% du poids du corps ajouté.

Un point qui peut paraître étonnant est le fait que les sujets chargent en moyenne plus leur jambe opérée lors de l'exercice de force maximale. Une explication peut être trouvée pour le groupe avec la jambe secondaire opérée. Selon Coren (1993), la jambe dominante est la jambe la plus agile, ce qui ne veut pas dire la jambe d'appui.

En observant les résultats obtenus lors des tests de sauts et de force, nous pouvons conclure que la répartition des charges varie non seulement selon les exercices, mais aussi en fonction du groupe.

Passons maintenant aux données statistiques. Les résultats obtenus, suite à l'analyse de variance répétée ANOVA, ne sont pas concluants. Aucun effet significatif, qui nous permettrait d'affirmer l'efficacité de l'entraînement d'équilibre, n'a été calculé pour l'ensemble des tests effectués (time effect : $F_{1;2}=3.163$; $P=0.089$). Afin de trouver des raisons qui peuvent expliquer cet échec, comparons notre étude à la recherche de Sannicandro et al. (2014) qui avait démontré l'efficacité d'un entraînement sensorimoteur sur la diminution de l'asymétrie au niveau des membres inférieurs.

Durée et forme de l'entraînement d'équilibre :

A) Notre session d'entraînement durait 30 minutes et était constituée de 6 différents exercices, tous plus ou moins similaires. Ces exercices se réalisaient sur deux jambes, afin de forcer les sujets à répartir les charges de manière uniforme entre leurs membres car si le poids de leur corps n'est pas distribué de manière égale entre les jambes lors de la réalisation d'exercices, l'équilibre ne peut être maintenu. Ceci a un effet bénéfique sur la diminution des asymétries au niveau des membres inférieurs (Behm & Colado, 2012).

B) Dans leur étude, Sannicandro et al. (2014) proposent un entraînement d'équilibre sur la durée. Le groupe expérimental a réalisé un total de douze séances d'entraînements d'équilibre, soit deux séances de trente minutes d'entraînement par semaine et cela sur une période de six semaines. Ces séances comprenaient différents types d'exercices :

Table 1. Balance training session 1.

Exercise	Task	Sets x repetitions	Recovery time
1. Balance and stability	High skipping with single leg halt every 5 skips.	6 x 5 per limb	20 sec
2. Balance and strength	4 diagonal single-legged bounds, maintaining equilibrium before the last bound for 3 sec.	4 x 6	30 sec
3. Balance and strength	6 forward bounds, maintaining equilibrium before the last bound for 3 sec.	3 x 4 per limb	45 sec
4. Balance and strength	10 low rows using an elastic exercise band bound to a support performed against a bipodalic inflatable disk.	4 x 10	45 sec
5. Balance and strength	2 Kg medicine ball chest passes whilst balancing on a bipodalic inflatable disk.	4 x 10	2 min
6. Balance and strength	2 Kg medicine ball chest passes with torsion whilst standing on one leg.	4 x 6 (twice per limb)	2 min

Table 2. Balance training session 2.

Exercise	Task	Sets x repetitions	Recovery time
1. Balance and stability	Lateral raises (2 Kg dumb-bells) whilst standing on one leg on a Bosu balance trainer	3 x 10	2 min.
2. Balance and strength	Balancing on an inflatable Skimmy cushion (Sixtus, Italy) for 30 sec.	2 x 4 per limb	30 sec.
3. Balance and strength	4 two-legged successive jumps on the ground from an inflatable disk, maintaining landing position for at least 3 sec.	4 x 4	30 sec.
4. Balance and strength	Step-ups on a Bosu balance trainer.	4 x 10	30 sec.
5. Balance and strength	Two-legged squats on unstable surface (Temix, Erregroup, Italy).	3 x 10	1 min.
6. Balance and strength	Step-ups on a Bosu balance trainer whilst grasping 4 Kg dumb-bells.	4 x 8	45 sec.

Fig. 25: Contenu des séances d'entraînement de l'étude de Sannicandro et al. (2014)

On constate, en observant l'illustration ci-dessus, que les exercices réalisés sont variés. Des exercices de sauts sont aussi inclus.

Un entraînement sur la durée est plus bénéfique car le corps a le temps de s'habituer. De plus, des exercices variés, mais en lien avec les tests réalisés aident à obtenir de meilleurs résultats.

Sujets :

A) Dans notre étude, deux groupes étaient composés de sujets ayant subi une reconstruction du LCA et le troisième était un groupe contrôle. Nos sujets étaient âgés de 18 à 40 ans.

B) Les sujets de l'étude de Sannicandro et al. (2014) étaient de jeunes joueurs de tennis, sans blessure.

Le fait que nos sujets soient des personnes ayant été opérées au genou a pu influencer les résultats de l'entraînement d'équilibre. Comme Chmielewski (2011) l'a démontré dans son étude, la répartition des charges est déséquilibrée après une reconstruction chirurgicale du LCA. Une réduction des charges du côté du membre opéré est souvent observée. Les sujets des deux études ne se présentaient donc pas avec les mêmes conditions de départ. Mais l'opération des sujets n'est pas le seul problème car, en effet, nous n'avons pas non plus observé de résultats significatifs pour le groupe contrôle.

Suite à cela, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un entraînement d'équilibre plus varié, plus spécifique et sur une plus longue durée permettrait peut-être de diminuer les asymétries présentes chez des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du LCA. De plus amples recherches sur le sujet sont à mener.

Un des tests s'est tout de même révélé concluant : le test d'équilibre. En effet, l'analyse ANOVA a calculé un effet d'interaction $\text{time} \times \text{leg} \times \text{group}$ significatif ($\text{time} \times \text{leg} \times \text{group}$ effect : $F_{2;23} = 11.108$; $p < 0.001$). Ceci nous indique que l'entraînement a un effet différent sur les jambes selon les groupes. Les deux groupes de sujets opérés montrent une amélioration de l'équilibre suite au court entraînement sensorimoteur. Ceci va dans le sens de l'étude de Ogard (2011), sur les effets des entraînements sensorimoteurs et sur la proprioception. En revanche le groupe contrôle ne se comporte pas de la même manière. Les sujets ont obtenu, dès la première série de mesures, de très bons résultats. Ceci peut s'expliquer par le fait que quatre des neuf sujets pratiquent le ski ou le snowboard et prennent part à des entraînements d'équilibre. Ils avaient donc dès le départ un bon niveau, ce qui peut expliquer qu'ils ne se soient pas améliorés suite au court entraînement sensorimoteur.

Dans la littérature, nombre d'études évoquent les différences qui existent entre les hommes et les femmes au niveau du risque de blessure et de la rééducation (Chandrashekar et al., 2005; Di Stasi & Snyder-Mackler, 2012). Il serait intéressant

de mener la même étude avec uniquement des femmes ou uniquement des hommes et de voir si les résultats restent les mêmes. Hewett et al. (2009) avancent dans leur article que les entraînements proprioceptifs et neuromusculaires seraient encore plus efficaces chez les femmes.

Le sujet de la prévention a été évoqué dans ce travail, les données récoltées lors des différents tests pourraient aussi être analysées de manière individuelle et des programmes personnalisés pourraient être mis sur pied afin de répondre aux besoins de chacun. C'est ce que prône Hewett et al. (2009) pour atteindre des résultats optimaux.

Finalement relevons le fait qu'étonnamment peu de recherches ne séparent les sujets selon qu'ils aient été opéré à la jambe dominante ou à la jambe secondaire. Bien que nos résultats ne soient pas significatifs, il ressort quand même des différences entre les deux groupes selon les exercices. De plus amples recherches devraient être menées afin de déterminer si, effectivement, les groupes se comportent de manière significativement différente lors de différents tests.

6. Conclusion

Cette étude touchant à sa fin, il est temps de faire un bref retour sur les différents objets énoncés en début de travail et d'effectuer une synthèse rapide des résultats obtenus. Le premier but de ce travail était de mettre en évidence les différences de charges au niveau des membres inférieurs chez des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur lors d'exercices de sauts, de force, d'équilibre et de stabilité. Des différences ont certes été repérées, mais aucune donnée statistiquement significative ne peut être retenue. Cependant, en observant les résultats obtenus lors des tests de sauts et de force, nous pouvons dire que la répartition des charges varie non seulement selon les exercices, mais aussi en fonction des groupes.

Ensuite, la recherche s'intéressait à l'influence éventuelle d'un court entraînement sensorimoteur sur les performances lors des différents tests susmentionnés. Là non plus, aucune donnée significative n'est apparue. Cependant, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un entraînement d'équilibre plus varié, plus spécifique et sur une plus longue durée permettrait de diminuer les asymétries présentes chez des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du LCA. Notons quand même que l'entraînement sensorimoteur, malgré sa courte durée, a permis aux sujets opérés de s'améliorer de manière significative au test d'équilibre.

Finalement, retenons qu'une asymétrie au niveau des membres inférieurs est un facteur de risque pour les blessures au niveau du LCA (Sannicandro et al., 2014) et que les bienfaits de programmes préventifs et de rééducation contenant entre autres des exercices d'équilibre ont amplement été prouvés (Hewett et al., 2009).

7. Bibliographie

7.1. Articles

- Ardern, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2011a). Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med*, 45(7), 596-606.
- Ardern, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2011b). Return to the preinjury level of competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: two-thirds of patients have not returned by 12 months after surgery. *Am J Sports Med*, 39(3), 538-543.
- Arokoski, J. P., Jurvelin, J. S., Vaatainen, U., & Helminen, H. J. (2000). Normal and pathological adaptations of articular cartilage to joint loading. *Scand J Med Sci Sports*, 10(4), 186-198.
- Barber, S. D., Noyes, F. R., Mangine, R. E., McCloskey, J. W., & Hartman, W. (1990). Quantitative assessment of functional limitations in normal and anterior cruciate ligament-deficient knees. *Clin Orthop Relat Res*(255), 204-214.
- Behm, D., & Colado, J. C. (2012). The effectiveness of resistance training using unstable surfaces and devices for rehabilitation. *Int J Sports Phys Ther*, 7(2), 226-241.
- Bryant, A. L., Clark, R. A., Bartold, S., Murphy, A., Bennell, K. L., Hohmann, E., et al. (2008). Effects of estrogen on the mechanical behavior of the human Achilles tendon in vivo. *J Appl Physiol* (1985), 105(4), 1035-1043.
- Caraffa, A., Cerulli, G., Proietti, M., Aisa, G., & Rizzo, A. (1996). Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 4(1), 19-21.
- Carter, D. R., Beaupre, G. S., Wong, M., Smith, R. L., Andriacchi, T. P., & Schurman, D. J. (2004). The mechanobiology of articular cartilage development and degeneration. *Clin Orthop Relat Res*(427 Suppl), S69-77.
- Cerulli, G., Benoit, D. L., Caraffa, A., & Ponteggia, F. (2001). Proprioceptive training and prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *J Orthop Sports Phys Ther*, 31(11), 655-660; discussion 661.
- Chalmers, P. N., Mall, N. A., Moric, M., Sherman, S. L., Paletta, G. P., Cole, B. J., et al. (2014). Does ACL reconstruction alter natural history?: A systematic literature review of long-term outcomes. *J Bone Joint Surg Am*, 96(4), 292-300.
- Chandrashekar, Naveen, Slauterbeck, James, & Hashemi, Javad. (2005). Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: a cadaveric study. *Am J Sports Med*, 33(10), 1492-1498.
- Chmielewski, T. L. (2011). Asymmetrical lower extremity loading after ACL reconstruction: more than meets the eye. *J Orthop Sports Phys Ther*, 41(6), 374-376.

- Chmielewski, T. L., Wilk, K. E., & Snyder-Mackler, L. (2002). Changes in weight-bearing following injury or surgical reconstruction of the ACL: relationship to quadriceps strength and function. *Gait Posture*, 16(1), 87-95.
- Claiborne, T. L., Armstrong, C. W., Gandhi, V., & Pincivero, D. M. (2006). Relationship between hip and knee strength and knee valgus during a single leg squat. *J Appl Biomech*, 22(1), 41-50.
- Coren, Stanley. (1993). The lateral preference inventory for measurement of handedness, footedness, eyedness, and earedness: Norms for young adults. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31(1), 1-3.
- Cug, M., Ak, E., Ozdemir, R. A., Korkusuz, F., & Behm, D. G. (2012). The effect of instability training on knee joint proprioception and core strength. *J Sports Sci Med*, 11(3), 468-474.
- Di Stasi, S. L., & Snyder-Mackler, L. (2012). The effects of neuromuscular training on the gait patterns of ACL-deficient men and women. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 27(4), 360-365.
- Eiling, E., Bryant, A. L., Petersen, W., Murphy, A., & Hohmann, E. (2007). Effects of menstrual-cycle hormone fluctuations on musculoskeletal stiffness and knee joint laxity. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 15(2), 126-132.
- Elliot, D. L., Goldberg, L., & Kuehl, K. S. (2010). Young women's anterior cruciate ligament injuries: an expanded model and prevention paradigm. *Sports Med*, 40(5), 367-376.
- Ernst, G. P., Saliba, E., Diduch, D. R., Hurwitz, S. R., & Ball, D. W. (2000). Lower extremity compensations following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther*, 80(3), 251-260.
- Farshad, M., Gerber, C., Meyer, D. C., Schwab, A., Blank, P. R., & Szucs, T. (2011). Reconstruction versus conservative treatment after rupture of the anterior cruciate ligament: cost effectiveness analysis. *BMC Health Serv Res*, 11, 317.
- Gianotti, S. M., Marshall, S. W., Hume, P. A., & Bunt, L. (2009). Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: a national population-based study. *J Sci Med Sport*, 12(6), 622-627.
- Granacher, U., Muehlbauer, T., Doerflinger, B., Strohmeier, R., & Gollhofer, A. (2011). Promoting strength and balance in adolescents during physical education: effects of a short-term resistance training. *J Strength Cond Res*, 25(4), 940-949.
- Hewett, T. E., Beynon, B. D., Krosshaug, T., & Myklebust, G. (2009). Preventing Knee Injuries *Sports Injury Prevention* (pp. 49-71): Wiley-Blackwell.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr., Colosimo, A. J., McLean, S. G., et al. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med*, 33(4), 492-501.
- Holsgaard-Larsen, A., Jensen, C., Mortensen, N. H., & Aagaard, P. (2014). Concurrent assessments of lower limb loading patterns, mechanical muscle strength and functional performance in ACL-patients--a cross-sectional study. *Knee*, 21(1), 66-73.
- Kalberer, L., Meyer, S., & Gojanovic, B. (2013). *Einsatz eines neuen, multifaktoriellen "Return to Competition Score" für Athleten nach einer vorderen Kreuzbandruptur* (Vol. 61).
- Keays, S. L., Bullock-Saxton, J. E., Keays, A. C., Newcombe, P. A., & Bullock, M. I. (2007). A 6-year follow-up of the effect of graft site on strength, stability, range of motion, function, and joint degeneration after anterior cruciate ligament

- reconstruction: patellar tendon versus semitendinosus and Gracilis tendon graft. *Am J Sports Med*, 35(5), 729-739.
- Kobayashi, H., Kanamura, T., Koshida, S., Miyashita, K., Okado, T., Shimizu, T., et al. (2010). Mechanisms of the anterior cruciate ligament injury in sports activities: a twenty-year clinical research of 1,700 athletes. *J Sports Sci Med*, 9(4), 669-675.
- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., et al. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med*, 35(3), 359-367.
- Kvist, J. (2004). Rehabilitation following anterior cruciate ligament injury: current recommendations for sports participation. *Sports Med*, 34(4), 269-280.
- Kweon, Christopher, Lederman, EvanS, & Chhabra, Anikar. (2013). Anatomy and Biomechanics of the Cruciate Ligaments and Their Surgical Implications. In G. C. Fanelli (Ed.), *The Multiple Ligament Injured Knee* (pp. 17-27): Springer New York.
- Lambson, R. B., Barnhill, B. S., & Higgins, R. W. (1996). Football cleat design and its effect on anterior cruciate ligament injuries. A three-year prospective study. *Am J Sports Med*, 24(2), 155-159.
- Mandelbaum, B. R., Silvers, H. J., Watanabe, D. S., Knarr, J. F., Thomas, S. D., Griffin, L. Y., et al. (2005). Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *Am J Sports Med*, 33(7), 1003-1010.
- Mather, R. C., 3rd, Hettrich, C. M., Dunn, W. R., Cole, B. J., Bach, B. R., Jr., Huston, L. J., et al. (2014). Cost-Effectiveness Analysis of Early Reconstruction Versus Rehabilitation and Delayed Reconstruction for Anterior Cruciate Ligament Tears. *Am J Sports Med*, 42(7), 1583-1591.
- McLean, S. G., & Samorezov, J. E. (2009). Fatigue-induced ACL injury risk stems from a degradation in central control. *Med Sci Sports Exerc*, 41(8), 1661-1672.
- McNair, P. J., Wood, G. A., & Marshall, R. N. (1992). Stiffness of the hamstring muscles and its relationship to function in anterior cruciate ligament deficient individuals. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 7(3), 131-137.
- Myer, G. D., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2004). Rationale and Clinical Techniques for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Among Female Athletes. *J Athl Train*, 39(4), 352-364.
- Neitzel, J. A., Kernozek, T. W., & Davies, G. J. (2002). Loading response following anterior cruciate ligament reconstruction during the parallel squat exercise. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 17(7), 551-554.
- Ogard, William K. (2011). Proprioception in Sports Medicine and Athletic Conditioning. *Strength & Conditioning Journal*, 33(3), 111-118 110.1519/SSC.1510b1013e31821bf31823ae.
- Oiestad, B. E., Holm, I., Aune, A. K., Gunderson, R., Myklebust, G., Engebretsen, L., et al. (2010). Knee function and prevalence of knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective study with 10 to 15 years of follow-up. *Am J Sports Med*, 38(11), 2201-2210.
- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med*, 32(4), 1002-1012.

- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., Holme, I., & Bahr, R. (2003). Relationship between floor type and risk of ACL injury in team handball. *Scand J Med Sci Sports*, 13(5), 299-304.
- Orchard, J., Seward, H., McGivern, J., & Hood, S. (2001). Intrinsic and extrinsic risk factors for anterior cruciate ligament injury in Australian footballers. *Am J Sports Med*, 29(2), 196-200.
- Padua, D. A., Marshall, S. W., Boling, M. C., Thigpen, C. A., Garrett, W. E., Jr., & Beutler, A. I. (2009). The Landing Error Scoring System (LESS) Is a valid and reliable clinical assessment tool of jump-landing biomechanics: The JUMP-ACL study. *Am J Sports Med*, 37(10), 1996-2002.
- Paterno, M. V., Ford, K. R., Myer, G. D., Heyl, R., & Hewett, T. E. (2007). Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin J Sport Med*, 17(4), 258-262.
- Posthumus, M., September, A. V., O'Cuinneagain, D., van der Merwe, W., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2009). The COL5A1 gene is associated with increased risk of anterior cruciate ligament ruptures in female participants. *Am J Sports Med*, 37(11), 2234-2240.
- Quatman, C. E., & Hewett, T. E. (2009). The anterior cruciate ligament injury controversy: is "valgus collapse" a sex-specific mechanism? *Br J Sports Med*, 43(5), 328-335.
- Rougraff, B., Shelbourne, K. D., Gerth, P. K., & Warner, J. (1993). Arthroscopic and histologic analysis of human patellar tendon autografts used for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 21(2), 277-284.
- Sannicandro, I., Cofano, G., Rosa, R. A., & Piccinno, A. (2014). Balance training exercises decrease lower-limb strength asymmetry in young tennis players. *J Sports Sci Med*, 13(2), 397-402.
- Schindler, O. S. (2012). The story of anterior cruciate ligament reconstruction--Part 1. *J Perioper Pract*, 22(5), 163-171.
- Sun, H. B. (2010). Mechanical loading, cartilage degradation, and arthritis. *Ann N Y Acad Sci*, 1211, 37-50.
- Swanik, Charles Buz, Covassin, Tracey, Stearne, David J., & Schatz, Philip. (2007). The Relationship Between Neurocognitive Function and Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Am J Sports Med*, 35(6), 943-948.
- Taylor, Jeffrey B. (2011). Lower Extremity Perturbation Training. *Strength & Conditioning Journal*, 33(2), 76-83 10.1519/SSC.1510b1013e318211aaaa.
- Tengman, E., Brax Olofsson, L., Nilsson, K. G., Tegner, Y., Lundgren, L., & Hager, C. K. (2014). Anterior cruciate ligament injury after more than 20 years: I. Physical activity level and knee function. *Scand J Med Sci Sports*.
- Tengman, E., Brax Olofsson, L., Stensdotter, A. K., Nilsson, K. G., & Hager, C. K. (2014). Anterior cruciate ligament injury after more than 20 years. II. Concentric and eccentric knee muscle strength. *Scand J Med Sci Sports*.
- Wright, R. W., Magnussen, R. A., Dunn, W. R., & Spindler, K. P. (2011). Ipsilateral graft and contralateral ACL rupture at five years or more following ACL reconstruction: a systematic review. *J Bone Joint Surg Am*, 93(12), 1159-1165.
- Xie, X., Xiao, Z., Li, Q., Zhu, B., Chen, J., Chen, H., et al. (2014). Increased incidence of osteoarthritis of knee joint after ACL reconstruction with bone-patellar tendon-bone autografts than hamstring autografts: a meta-analysis of 1,443 patients at a minimum of 5 years. *Eur J Orthop Surg Traumatol*.

- Yosmaoglu, H. B., Baltaci, G., Kaya, D., & Ozer, H. (2011). Tracking ability, motor coordination, and functional determinants after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Sport Rehabil*, 20(2), 207-218.
- Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *Br J Sports Med*, 41 Suppl 1, i47-51.

7.2. Livres

- Faller, A., Sprumont, P., & Schünke, M. (2006). L'articulation du genou. In D. Boeck (Ed.), *Le corps humain* (5ème éd.). Bruxelles. 154-157.
- Weineck, J. (1997). *Manuel d'entraînement* (4th ed.). Paris: Editions Vigot.

7.3. Sites Internet

- <http://www.centredugenou.com/2-capsule-lanatomie-et-la-fonction-du-genou.html>, consulté le 2 août 2014
- http://chirurgiedusport.com/Traitements-GENOU-Ligament-Ligamentoplastie_du_LCA___les_techniques_actuelles___DIDT___KJ___DT4___TL_S___Macintosh___au___Fascia_Lata___tendon_quadricipital___double_faisceau___Lemaire___rupture_partiell-f-4-c-2336-sc-16-a-760193.html, consulté le 2 août 2014
- <http://www.chups.jussieu.fr/polys/histo/histoP1/POLY.Chp.5.1.2.html>, consulté le 2 août 2014
- <http://www.clubortho.fr/>, consulté le 2 août 2014
- http://www.docteurperraudin.com/lca_greffe_ligamentisation.html, consulté le 2 août 2014
- <http://www.orthopale.org/ligament-croise-anterieur.php>, consulté le 2 août 2014

8. Tables des illustrations

8.1. Figures

Fig. 1: Articulation du genou (droit). Illustration disponible sur: http://www.institut-genou.com/ligaments-genou-dechirure.html	9
Fig. 2: Les deux brins du ligament croisé antérieur. Illustration disponible sur : http://www.genou.com/	12
Fig. 3: Image tirée de l'étude de Kobayashi et al. (2010)	13
Fig. 4: Un grand angle Q et un faible espace intercondylaire sont des facteurs. Illustration disponible sur : http://www.onebodyclinic.co.uk/the-female-athlete/	14
Fig. 5: Les 4 phases de rééducation après une opération du LCA, illustration tirée de l'étude de Kalberer, Meyer et Gojanovic (2013)	19
Fig. 6: Drop Jump	30
Fig. 7: Landing	31
Fig. 8: Countermovement Jump	31
Fig. 9: Squats	32
Fig. 10: Posturomed	33
Fig. 11: Test de stabilité	33
Fig. 12: Illustration des 6 postes de l'entraînement sensorimoteurs	34
Fig. 13: Questions tirées de l'étude de Coren (1993)	35
Fig. 14: Comparaison de la différence des charges entre les deux jambes pour le test de CMJ et pour le test d'atterrissage	38

Fig. 15: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des atterrissages pour le groupe opéré à la jambe dominante	39
Fig. 16: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des atterrissage pour le groupe opéré à la jambe secondaire	40
Fig. 17: Comparaison des moyennes des valeurs obtenues lors des tests de CMJ pour le groupe des sujets opérés et le groupe contrôle	40
Fig. 18: Comparaison des moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors de squats pour les deux groupes de sujets opérés	41
Fig. 19: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des tests de force max pour le groupe jambe dominante	42
Fig. 20: Moyennes des charges exercées sur chaque jambe lors des tests de force max pour le groupe jambe secondaire opérée	42
Fig. 21: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour le groupe jambe dominante opérée	43
Fig. 22: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour le groupe jambe secondaire opérée	43
Fig. 23: Moyennes de l'ensemble des déviations lors du meilleur essai pour	44
Fig. 24: Moyennes des trois essais réalisés par le sujet 18ACL lors du pré-test et du post-test de Landings	44
Fig. 25: Contenu des séances d'entraînement de l'étude de Sannicandro et al. (2014)	48

8.2. Tableau

Tableau 1: Indices de symétrie obtenus par les sujets lors des différents tests Sannicandro et al.	45
--	----

9. Déclaration personnelle

Je soussignée certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis mutandis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel.

Lieu, date : _____

Signature : _____

10. Droits d'auteur

Je soussignée reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur - y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles - à l'Université de Fribourg.

La cession à tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord de la soussignée uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière.

Lieu, date : _____

Signature : _____

11. Annexes

ANNEXE 1 : Note d'information

ANNEXE 2 : Consentement

ANNEXE 3 : Fiche protocolaire

ANNEXE 4 : Questionnaire aux participants

ANNEXE 5 : Résultats des tests et graphiques

Asymétrie des charges au niveau des extrémités inférieures après une reconstruction du LCA

Note d'information destinée aux participants de l'étude

Vous êtes invités à prendre part à une étude de recherche de l'unité de sport de l'Université de Fribourg. Cette étude porte sur les éventuelles asymétries des charges engendrées lors de différents efforts. Notre étude observera les extrémités inférieures ayant subi une reconstruction du ligament croisé antérieur du genou.

But de l'étude

Suite à une reconstruction du ligament croisé antérieur, une asymétrie des charges a pu être observée au niveau des extrémités inférieures dans diverses activités. Nous allons comparer les facultés des deux jambes à l'aide de différents tests de sauts, de force et d'équilibre, afin de mettre en évidence s'il y a ou non une asymétrie entre le membre opéré et le membre non-opéré. Nous vous demandons de réserver une séance avec nous pour l'enregistrement des données nécessaires à notre étude. Cette dernière se déroulera de la manière suivante : pré-tests – intervention sensorimotrice – tests – fatigue maximale – post-tests. Les différents tests évalueront vos capacités en se basant sur trois critères différents (sauts, force et équilibre) et seront entrecoupés, dans un premier temps, par un entraînement sensorimoteur de 30 minutes, puis par un exercice visant une fatigue musculaire maximale.

Conditions de participation à l'étude

Pour participer à cette étude, vous devez être en bonne santé, âgé de 18 à 40 ans, avoir subi une reconstruction du ligament croisé antérieur datant de plus de deux ans, ne pas souffrir de douleurs dorsales ou de douleurs dans les membres inférieurs et votre jambe non-opérée ne doit pas avoir subi de dommage dans les six derniers mois.

Liberté de participation

Vous êtes libre de décider si vous participez ou non à l'étude. Si vous décidez de participer, vous signerez un formulaire de consentement. Même après avoir signé ce formulaire, vous êtes libre de vous retirer de l'étude à n'importe quel moment sans donner de raison. La décision de vous retirer de l'étude ou de ne pas y participer n'aura aucune conséquence sur vos études (si vous êtes étudiant) ou sur votre engagement à l'Université (si vous êtes employé).

Avantages personnels liés à la participation

Les résultats chiffrés qui ressortiront de l'étude vous permettront une prise de conscience quant à l'état de récupération de votre jambe lésée. Ils permettront de mettre en évidence les éventuelles différences entre vos deux jambes.

Méthodes de mesure et effets secondaires

Les effets secondaires sont peu probables lors de l'utilisation des dispositifs de mesures. Néanmoins, il est impossible de les exclure complètement. Les techniques de mesure sont présentées et expliquées ci-dessous afin d'être certain qu'aucun exercice ne vous posera de problème.

- Test de force : la force maximale ainsi que la force explosive seront mesurées au moyen d'un appareil de fitness appelé Multipower.
- Test de saut : vous effectuerez des drop jump de 30 cm et 50 cm (drop jump = saut vers le bas depuis une hauteur donnée suivi d'un saut « rebond »), des counter movement jump (= saut avec mouvement d'élan). Pour ces différents tests, des plateformes de force seront utilisées afin de calculer le chargement de vos deux jambes lors du départ et de l'atterrissage des sauts. Vous effectuerez également des sauts à une jambe qui seront mesurés et filmés, puis analysés grâce au logiciel Dartfish.
- Test d'équilibre : votre équilibre statique sur une jambe ainsi que les déplacements de votre centre de gravité seront enregistrés grâce à la plateforme suspendue Posturomed.

Confidentialité

Toutes les données de l'enregistrement et de l'analyse seront traitées de manière anonyme. Les informations personnelles que vous nous donnerez et qui vous identifient seront archivées de manière sûre et ne seront pas disponibles librement. Ces informations seront toutefois disponibles pour les chercheurs directement impliqués dans l'étude. Vous aurez le droit de voir ces informations vous concernant et de corriger les éventuelles erreurs.

Résultats de l'étude

Les résultats généraux de l'étude seront publiés dans la littérature scientifique. Vos données individuelles ne pourront pas être identifiées. Si vous le désirez, nous vous fournirons volontiers une copie de la publication.

Consentement pour l'étude :

« Asymétrie des charges au niveau des extrémités inférieures après une reconstruction du LCA »

Je, soussigné(e), certifie :

- Consentir à participer volontairement à l'étude susmentionnée comme sujet.
- Avoir lu, compris et accepté l'information contenue dans la « Note d'information destinée aux participants de l'étude ».
- Avoir pu poser toutes les questions souhaitées et avoir reçu des réponses satisfaisantes de la part des personnes impliquées dans la recherche.
- Etre informé(e) que je peux me retirer à tout moment de l'étude et sans préjudice.
- Etre informé(e) que toutes les données personnelles, tous les résultats obtenus à mon sujet et ma participation à l'étude sont confidentiels et ne seront disponibles que pour les chercheurs directement impliqués dans cette étude.
- Etre informé(e) que les résultats obtenus lors de l'étude pourront être publiés de manière anonyme, et sous une forme qui ne peut pas m'identifier.
- Avoir donné mon accord concernant les points ci-dessus.

Sujet de l'étude

Nom: _____ Prénom: _____

Signature: _____

Personne ayant conduit l'entretien de consentement

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

Nom: _____ Prénom: _____

Signature: _____



ANNEXE 3 : Fiche protocolaire

Protocol „ACL study“

subject: _____ date: _____

File Nr.: _____ACL

condition	program	values	Other
Instruction subjects	Stimuli: depends on condition		height _____cm
Warm-up	Record: 1. channel definition 2.Setup_Record		mass _____kg Age _____years
01. Drop Jumps	Stimuli: DJ and landings: drop jumps and landings.set		
02. Landings	Stimuli: DJ and landings: drop jumps and landings.set		
03. CMJ	CMJ: CMJ.set		
04. squats 7,5 kg	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		
05. squats 70% body weight	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		70% = _____
06. squats max force	Stimuli: MAX force.set		
Posturomed 10 sec left	No recordings in PC!	X-Wert Y-Wert _____ _____ _____ _____ _____ _____	
Posturomed 10 sec right	No recordings in PC!	X-Wert Y-Wert _____ _____ _____ _____ _____ _____	
Qualitativ	left	right	
balance training			
07. Drop Jumps	Stimuli: DJ and landings: drop jumps and landings.set		
08. Landings	Stimuli: DJ and landings: drop jumps and landings.set		

09. CMJ	CMJ: CMJ.set		
10. squats 7,5 kg	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		
11. squats 70% body weight	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		70% = _____
12. squats max force	Stimuli: MAX force.set		
Posturomed 10 sec left	No recordings in PC!	X-Wert Y-Wert 	
Posturomed 10 sec right	No recordings in PC!	X-Wert Y-Wert 	
Qualitativ	left	right	
Fatigue			
13. squats max force	Stimuli: MAX force.set		
14. squats 70% body weight	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		70% = _____
15. squats 7,5 kg	Stimuli: Leg press frequency 0.8sec.set		
16. Landings	Stimuli: DJ and landings: drop jumps and landings.set		
17. Drop Jump	CMJ: DJ and landings: drop jumps and landings.set		
Qualitativ	left	right	

**« Asymétrie des charges au niveau des extrémités inférieures
après une reconstruction du LCA »**

QUESTIONNAIRE AUX PARTICIPANTS

Nom : _____ Prénom : _____

Age : _____ Sexe : ☐ masculin ☐ féminin

Poids : _____ Taille : _____

N° tél. : _____ Email : _____

Sport(s) pratiqué(s) et niveau: _____

Jambe opérée : ☐ forte ☐ faible ☐ gauche ☐ droite

Brève description de l'accident : _____

Date de l'accident : _____

Type d'opération : _____

Date de l'opération : _____

Est-ce que vos ménisques ont été touchés ? ☐ oui ☐ non

Après avoir réalisé cette série de tests, pensez-vous qu'il existe une asymétrie entre vos deux jambes ? Merci de cocher le côté qui vous a paru être le plus fort/performant ou alors, si vous n'avez perçu aucune différence, le mot « idem ».

Saut

☐ + gauche ☐ idem ☐ + droite

Equilibre

☐ + gauche ☐ idem ☐ + droite

Force

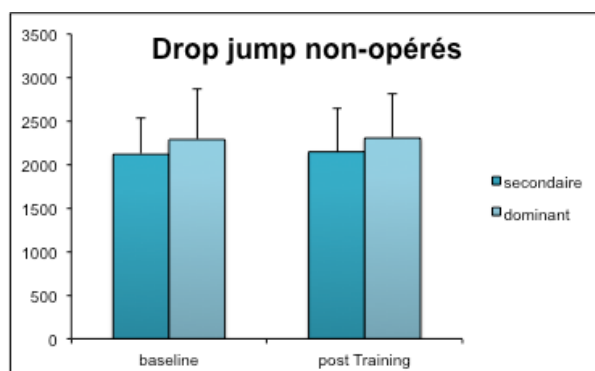
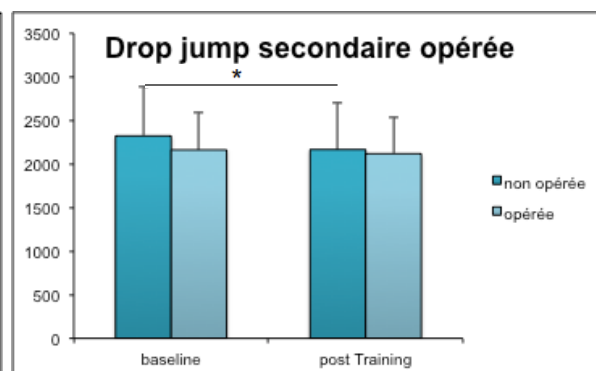
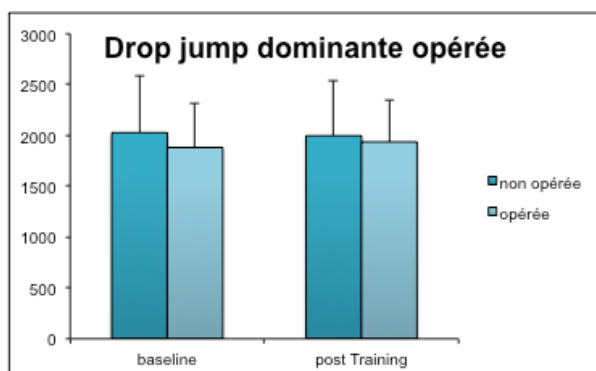
☐ + gauche ☐ idem ☐ + droite

ANNEXE 5 : Résultats des tests et graphiques

Tests de sauts

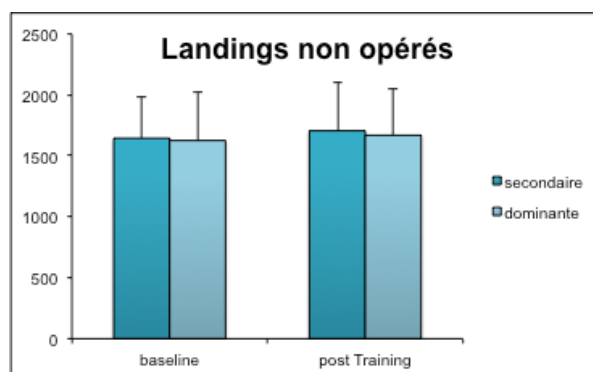
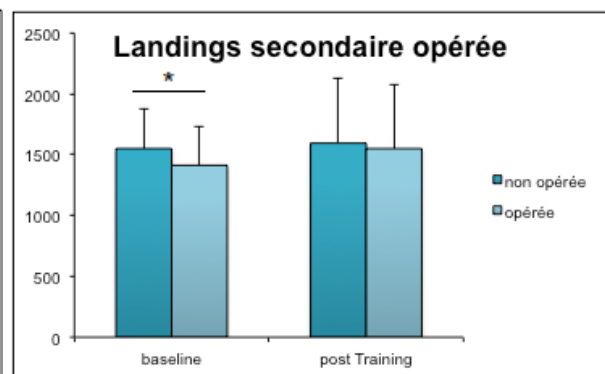
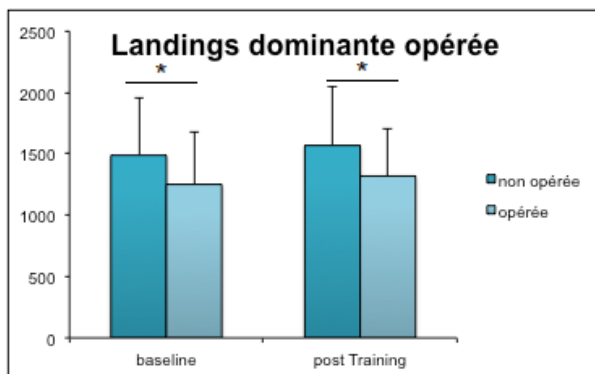
A) Drop Jump (unités en Newton)

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	1881.98	432.69	2027.69	556.98	1936.80	415.98	1997.38	541.31
Opéré jambe secondaire	2323.97	572.71	2131.77	427.01	2167.04	529.43	2119.62	411.37
Groupe contrôle	2289.42	573.26	2119.41	416.75	2306.29	510.32	2147.31	506.11



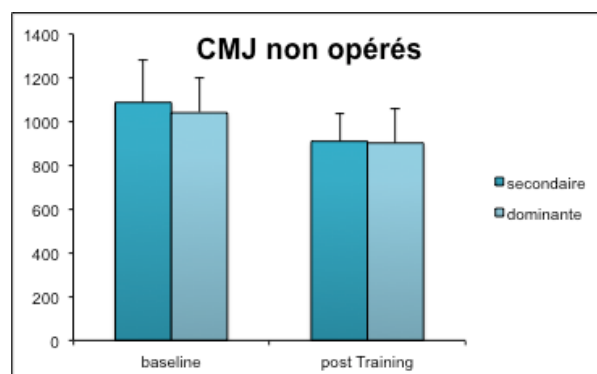
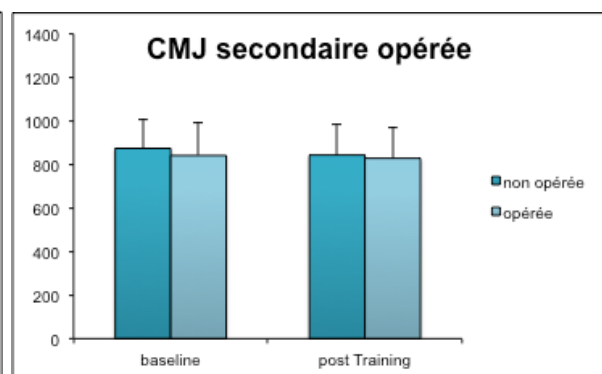
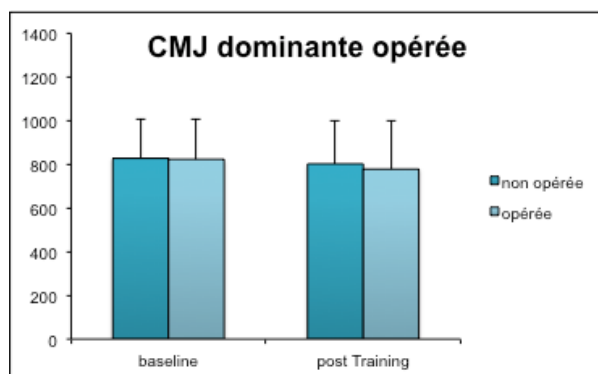
B) Landings (unités en Newton)

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	1251.50	425.43	1488.88	464.52	1320.02	386.80	1568.88	480.68
Opéré jambe secondaire	1550.70	326.31	1413.76	313.21	1594.68	529.62	1550.49	525.40
Groupe contrôle	1625.92	398.07	1645.38	344.22	1669.87	377.99	1705.92	393.34



C) Countermovement Jump (unités en Newton)

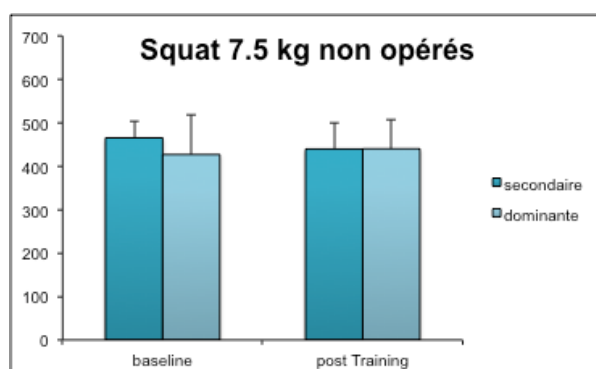
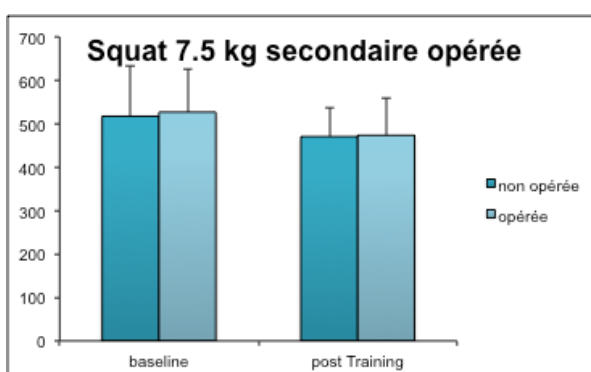
	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	823.15	184.17	827.46	181.06	778.06	220.91	802.05	195.80
Opéré jambe secondaire	874.45	133.03	841.48	152.66	843.45	143.75	828.72	144.09
Groupe contrôle	1040.78	159.06	1087.64	197.16	902.04	157.50	910.03	124.30



Tests de force

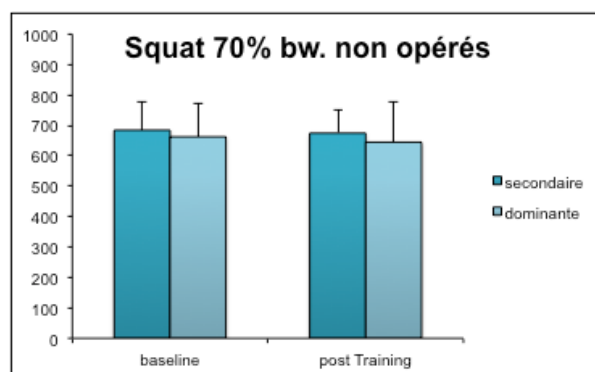
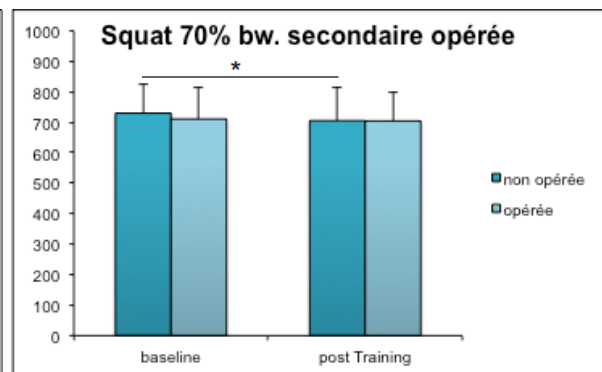
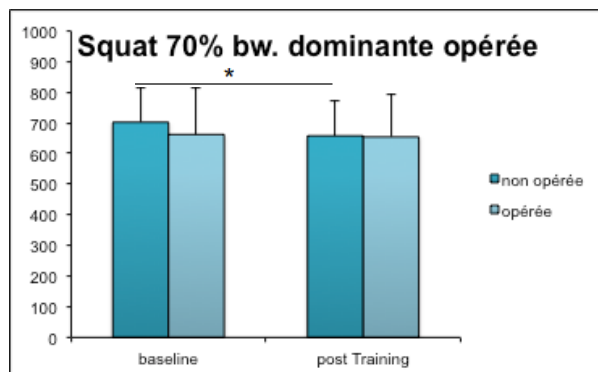
A) Squats avec barre de 7.5 kg (unités en Newton)

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	457.61	78.77	456.73	70.10	449.10	94.13	432.17	67.62
Opéré jambe secondaire	517.30	114.43	526.67	97.68	470.41	66.58	473.35	84.91
Groupe contrôle	426.75	92.65	465.06	38.00	440.06	67.97	439.58	61.05



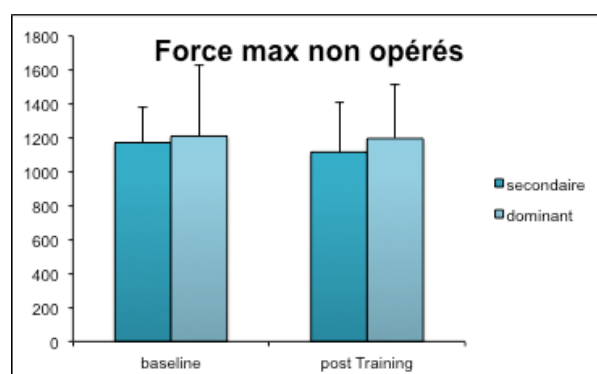
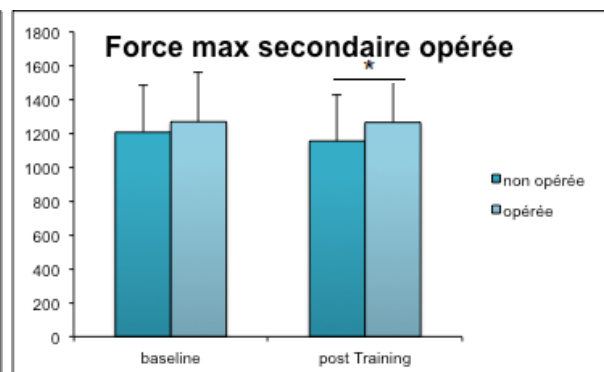
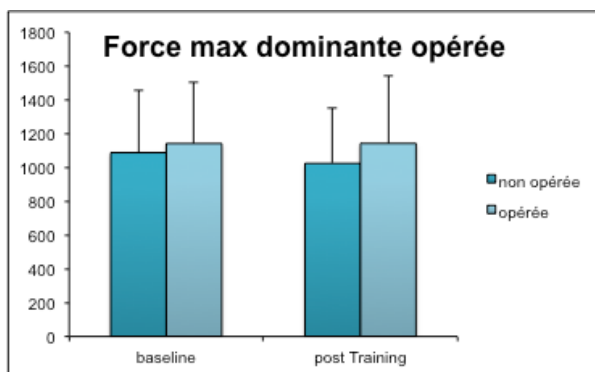
B) Squats 70% du poids du corps (unités en Newton)

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	662.58	149.41	702.37	111.16	654.29	141.23	658.14	115.20
Opéré jambe secondaire	730.06	96.51	711.11	105.37	705.75	106.77	704.88	95.84
Groupe contrôle	651.71	110.09	684.29	93.08	645.02	131.54	674.33	78.35



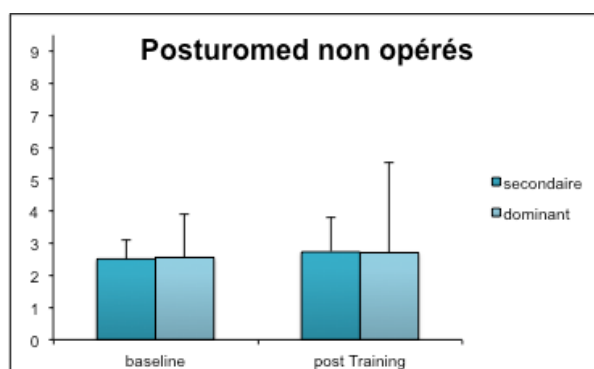
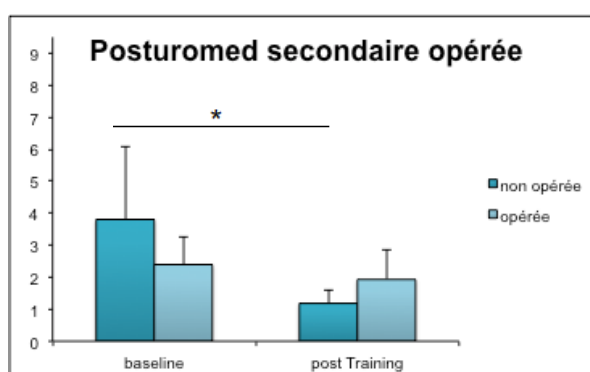
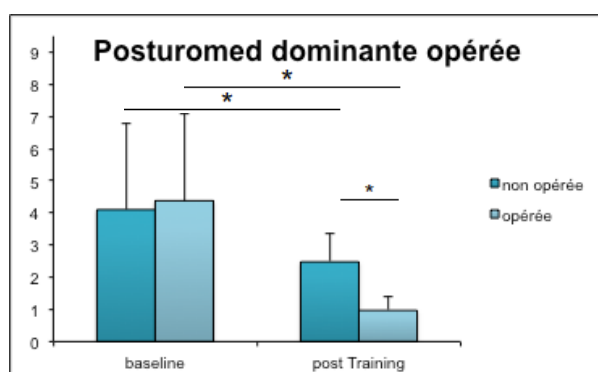
C) Force max (unités en Newton)

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Opéré jambe dominante	1141.99	364.49	1087.84	369.65	1142.71	402.53	1024.60	330.92
Opéré jambe secondaire	1207.21	282.71	1269.69	296.19	1155.80	271.58	1265.38	275.75
Groupe contrôle	1210.47	416.86	1171.67	210.46	1196.06	320.49	1116.20	291.04



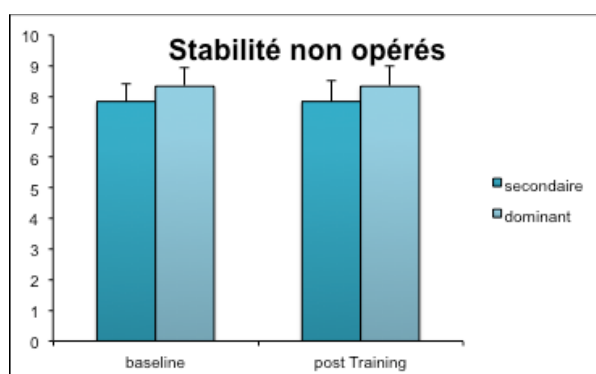
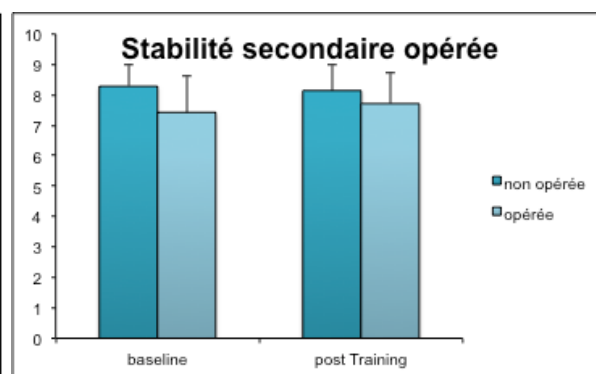
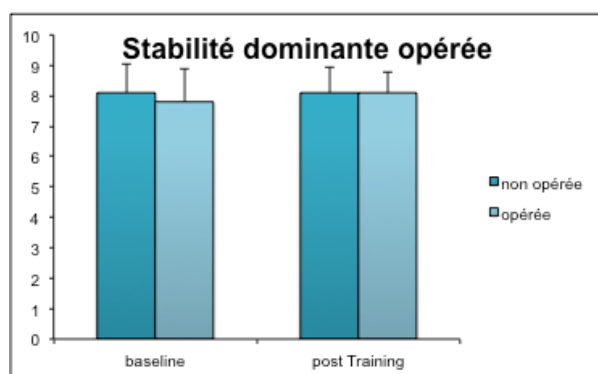
Tests d'équilibre

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x} MIN	σ	\bar{x} MIN	σ	\bar{x} MIN	σ	\bar{x} MIN	σ
Opéré jambe dominante	4.38	2.71	4.10	2.68	0.97	0.42	2.48	0.89
Opéré jambe secondaire	3.80	2.25	2.39	0.87	1.18	0.43	1.93	0.91
Groupe contrôle	2.56	1.35	2.52	0.58	2.71	2.83	2.74	1.06



Tests de stabilité

	Baseline				Post-Training			
	Dominante		Non-dominante		Dominante		Non-dominante	
	\bar{x} Somme	σ	\bar{x} Somme	σ	\bar{x} Somme	σ	\bar{x} Somme	σ
Opéré jambe dominante	7.80	1.08	8.10	0.94	8.10	0.70	8.10	0.83
Opéré jambe secondaire	8.29	0.70	7.43	1.18	8.14	0.83	7.71	1.03
Groupe contrôle	8.33	0.63	7.83	0.57	8.33	0.67	7.83	0.67



12. Remerciements

Ce projet d'étude n'aurait pas pu être réalisé sans le soutien de plusieurs personnes. Je tiens tout d'abord à remercier mon co-conseiller, M. Martin Keller, pour son engagement et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son aide m'a été très précieuse pour apprendre à utiliser les instruments de mesures et pour traiter les nombreuses données statistiques. Mes remerciements vont aussi à mon conseiller, le Professeur Wolfgang Taube, pour son soutien à l'ensemble du projet. Un immense merci aux vingt-sept sujets qui ont répondu positivement à l'annonce et ont accepté de participer aux différents tests de cette étude. Je remercie également l'Unité des Sciences du Mouvement et du Sport de l'Université de Fribourg d'avoir mis à disposition le matériel et l'espace indispensables à la réalisation de ce projet. Mes remerciements également à M. Nicolas Bussard, professeur de culture générale, pour la relecture de ce travail. Et finalement un grand merci à Mme Camille Muller qui a réalisé son travail en parallèle pour sa collaboration lors de la recherche des sujets et ainsi que durant les séances de mesures. Toutes ces personnes m'ont aidée à réaliser ce travail enrichissant à tous points de vue. Qu'elles reçoivent ici, mes sincères remerciements !