

*Travail de Master en vue de l'obtention du Master en 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*

*Quelle est l'influence d'une fatigue musculaire maximale du
quadriceps sur la charge des extrémités inférieures lors de
performances de sauts et de force et sur la stabilité du genou ?*

Camille MULLER

Sous la direction du Prof. Dr. Wolfgang Taube, avec la collaboration de Martin Keller

Juin 2014

Table des matières

1. Sommaire	5
2. Introduction	7
2.1 Présentation du sujet dans son contexte et situation initiale	7
2.2 Problématique et objectifs de ce travail	9
3. Approche théorique	11
3.1 Anatomie du genou	11
3.1.1 Le ligament croisé antérieur	13
3.2 Opération du ligament croisé antérieur	14
3.3 Réhabilitation après une reconstruction du ligament croisé antérieur	17
3.3.1 Phases de réhabilitation immédiate	17
3.3.2 Réhabilitation à long terme	19
3.4 Symétrie des charges	20
3.5 Mesures de sauts, de force et de stabilité du genou	23
3.6 Fatigue musculaire et asymétrie	24

4. Méthode	27
4.1 Sujets	27
4.2 Protocole	27
4.3 Tests	28
4.3.1 Tests de sauts	29
4.3.2 Tests de force	31
4.3.3 Analyse subjective de la stabilité du genou	33
4.4 Fatigue musculaire maximale	34
4.5 Séparation des groupes	35
4.6 Traitement et analyse statistique des données	36
5. Résultats	37
5.1 Tests de sauts	37
5.2 Tests de force	39
5.3 Analyse subjective de la stabilité du genou	42
5.4 Analyse statistique des résultats	43
5.5 Résultats de l'ANOVA	44
6. Discussion	49

7. Conclusion	53
8. Bibliographie	54
8.1 Articles	54
8.2 Livre	57
8.3 Sites internet	57
8.4 Document pdf	57
9. Table des illustrations	58
9.1 Liste des Figures	58
9.2 Liste des Tableaux	59
10. Annexes	60
10.1 ANNEXE I : Note d'information destinée aux participants de l'étude	60
10.2 ANNEXE II : Consentement	62
10.3 ANNEXE III : Questionnaire pour les participants	63
11. Remerciements	64
12. Déclarations	65
12.1 Déclaration personnelle	65
12.2 Déclaration de l'auteur	65

1. Sommaire

But : Le but de ce travail est de mettre en évidence des différences de charges au niveau des membres inférieurs sur des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur lors d'exercices de sauts et de force. Nous analyserons également la performance des sujets lors de sauts sur une jambe pour quantifier la stabilité du genou. La recherche s'intéressera ensuite à l'influence d'une fatigue musculaire maximale sur les performances des sujets lors des différents tests.

Méthode : 27 sujets ont participé à la recherche. Parmi ces participants, 18 ont subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur, datant au minimum de deux ans. Les autres participants forment un groupe contrôle. Tous les sujets sont issus d'un milieu sportif et prennent régulièrement part à des activités physiques comprenant des sauts, des courses, des mouvements de pivot ou des stops and go. Les sujets ont reçu toutes les informations nécessaires au bon déroulement de la recherche et ont pu poser des questions. Ils ont également signé un formulaire de consentement pour que la recherche se déroule en accord avec les règles d'éthique en vigueur. Pour faire la comparaison des charges entre le membre opéré et le membre sain, différents tests ont été établis. Ces tests comprennent des tests de sauts, avec un test d'atterrissage et un test de drop jump, des tests de force, avec un test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée, un test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée et un test de force maximale, et finalement une appréciation subjective de la stabilité du genou. Pour les tests de sauts et de force, deux plateformes de forces ont été utilisées, une pour chaque jambe, afin de connaître leur charge respective. Après la session de tests constituant la ligne de base, les participants ont dû effectuer un exercice visant à une fatigue musculaire maximale du quadriceps. Cet exercice s'effectue à la legpress du fitness. Le sujet doit faire le plus de répétitions possible et pousser ses limites au maximum afin d'être très proche de la fatigue musculaire maximale impliquant une impossibilité de continuer. Lorsqu'il n'en peut vraiment plus, il revient rapidement à la salle d'expérimentation et se met directement en place pour réaliser à nouveau les tests.

Résultats : Après une analyse de variance répétée, avec les facteurs intra-sujets de tests, de temps, et de jambe, et avec le facteur inter-sujets de groupe, on trouve que la fatigue a une influence différente sur les deux jambes, et que cette influence est aussi différente selon les groupes.

Discussion : Les résultats obtenus dans les tests de ce travail montrent des différences de charges entre les deux jambes. On remarque une charge réduite du côté opéré lors de l'atterrissage des sauts, une charge plus importante sur la jambe opérée lors du test de force maximale, et une charge semblable entre les deux jambes lors des séries de squats. Lors de l'atterrissage de sauts, le participant doit effectuer un mouvement de freinage du centre de gravité par une contraction musculaire excentrique. La réduction des charges sur le côté opéré peut s'expliquer par le fait qu'un atterrissage de saut peut être traumatisant pour l'articulation. Le sujet cherche donc inconsciemment à protéger sa jambe opérée en compensant avec l'autre jambe. Pour ce qui est du test de force maximale et des tests de squats, il est difficile d'émettre une hypothèse concernant la raison pour laquelle on trouve ces résultats. Cependant, pour la force maximale, on pourrait suggérer que, comme l'exercice consiste en une contraction isométrique maximale et sans mouvement, le participant ne cherche pas à protéger son genou, mais crée au contraire toute la puissance dont il est capable.

Conclusion : Souvent, les blessures sportives interviennent en fin de compétition, lorsque la fatigue se fait sentir. Il serait donc intéressant d'établir une série de tests fonctionnels standardisés comprenant une comparaison des performances avant et après la fatigue. Une vision d'avenir consisterait à déterminer si l'influence de la fatigue sur la répartition des charges au niveau des extrémités inférieures peut être positive ou est strictement négative pour les articulations, et si elle peut mener à un risque accru de nouvelle blessure ou de récurrence de blessure au niveau du ligament croisé antérieur.

2. Introduction

2.1 Présentation du sujet dans son contexte et situation initiale

Parmi toutes les blessures du genou liées au sport, un cinquième impliquent le ligament croisé antérieur, qui est la structure la plus couramment atteinte. La conséquence principale de la rupture du ligament croisé antérieur est l'instabilité du genou, qui empêche le retour de l'athlète aux sports, et implique souvent une retraite anticipée¹. Les traitements conservateurs peuvent augmenter le sentiment de stabilité et de réadaptation, mais l'évaluation des résultats objectifs et le taux de retour à un niveau préopératoire restent faibles². Par conséquent, les traitements opératoires sont souvent prescrits pour reconstruire chirurgicalement le ligament croisé antérieur afin de rétablir la stabilité du genou et de permettre aux athlètes d'avoir à nouveau un mode de vie actif et de recommencer le sport.

Le but cette recherche est donc de déterminer si la reconstruction du ligament croisé antérieur permet aux athlètes d'effectuer des mouvements de sauts et d'atterrissage de la même manière que des sujets sains. L'étude se concentrera principalement sur la répartition de la charge entre la jambe gauche et la jambe droite lors de sauts, d'atterrissages, et durant des exercices de force. On peut imaginer obtenir des résultats qui montrent une distribution inégale de la charge pour les sujets ayant subi une blessure du ligament croisé antérieur. Cette inégalité peut s'expliquer par le fait qu'ils emploient inconsciemment plus la jambe saine afin de protéger la jambe opérée³.

Ces dernières années, plusieurs recherches ont été effectuées concernant la réhabilitation après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur. Certaines études montrent qu'un déséquilibre intervient entre les membres inférieurs au niveau de la charge lors de différents exercices pouvant être utilisés dans le programme de réhabilitation⁴. Les exercices principaux dans lesquels on peut remarquer des asymétries sont les squats, les sauts verticaux, les enjambements de marches et les mouvements latéraux⁵. Certains chercheurs se sont aussi demandé si la force du quadriceps était une preuve de la récupération. Ils ont donc cherché à mettre en lien la force du quadriceps et les différences de charges entre le membre opéré et le membre sain pour voir si leur théorie se confirmait⁶.

¹ (Schindler, 2012)

² (Keays, Bullock-Saxton, Keays, Newcombe, & Bullock, 2007)

³ Masterarbeitsthemen13.pdf

⁴ (Neitzel, Kernozek, & Davies, 2002)

⁵ (Chmielewski, 2011)

⁶ (Chmielewski, Wilk, & Snyder-Mackler, 2002)

Dans cette étude, nous prendrons en compte uniquement les cas de reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur, et nous laisserons donc de côté les cas de réhabilitation par traitement conservateur. La reconstruction chirurgicale peut se faire de différentes manières. Elle s'effectue souvent quelques temps après la blessure afin que le genou ne soit plus douloureux et qu'il n'y ait plus d'épanchement pour éviter d'éventuelles complications lors de l'intervention. Une grande partie des opérations se fait par autogreffe du tiers médian du tendon rotulien, mais il existe aussi d'autres possibilités. Après une plastie du ligament croisé antérieur, la phase de réhabilitation postopératoire s'étend généralement sur une période minimale de six mois. Différents facteurs sont importants lors de la réhabilitation. Yosmaoglu et al.⁷ ont effectué une recherche afin de mettre en évidence le développement de la coordination motrice, de la force et de la capacité fonctionnelle lors de la récupération, six mois et une année après une opération du ligament croisé antérieur. Ils ont remarqué une amélioration de la force musculaire et de la capacité fonctionnelle. Toutefois, la coordination motrice concentrique et excentrique est restée faible. La progression de la coordination motrice n'a donc pas été influencée par le développement de la force. Cela nous montre qu'il est recommandé d'inclure les exercices neuromusculaires de coordination dans les programmes de réhabilitation à long terme.

Un problème majeur qui peut survenir lors de la réhabilitation peut être lié à des exercices prescrits qui peuvent être mal appropriés si la répartition de la charge n'est pas équivalente entre les deux jambes. Des études ont démontré des résultats différents en fonction des asymétries existantes ou non au niveau des charges entre les membres inférieurs⁸. En effet, si on demande à un patient d'effectuer des squats alors qu'il n'a pas de symétrie des charges entre sa jambe opérée et sa jambe saine, un risque de blessure ultérieure n'est pas négligeable. Ainsi, comme l'ont montré Chmielewski et al.⁹, et Neitzel et al.¹⁰, si la récupération n'est pas symétrique, une compensation peut survenir au niveau de la hanche et de la cheville pour protéger le ligament reconstruit, et un risque de déséquilibre et de nouvelle blessure est donc possible.

⁷ (Yosmaoglu, Baltaci, Kaya, & Ozer, 2011)

⁸ (Chmielewski et al., 2002)

⁹ (Chmielewski et al., 2002)

¹⁰ (Neitzel et al., 2002)

2.2 Problématique et objectifs de ce travail

La problématique que l'on va aborder dans ce travail est la suivante : Y a-t-il une différence de performance dans des exercices de sauts, de force, et de stabilité du genou qui se manifeste par une asymétrie des charges entre les membres inférieurs d'une personne ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur il y a au moins deux ans ? De plus, cette asymétrie subit-elle une influence lorsque l'on pousse le sujet à une fatigue musculaire maximale du quadriceps ?

Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une différence de performance existe et se manifeste par une répartition asymétrique des charges entre les deux jambes. Nous pouvons également supposer que cette différence est influencée par la fatigue musculaire maximale. En ce qui concerne le délai, l'opération doit dater au moins de deux ans, car si l'on prenait les sujets directement après leur retour de convalescence, il y aurait encore une légère influence des exercices de physiothérapie. De plus, l'aspect psychique joue aussi un rôle dans ce choix car nous avons pu constater que, directement après le retour au sport, bien que le membre opéré soit physiquement rétabli, le sujet peut encore avoir des faiblesses psychologiques dues à des peurs liées à certains exercices.

Il est important de mentionner que d'autres études se sont déjà intéressées à ce sujet. Ainsi, l'équipe de Gustavsson et al.¹¹ a effectué une recherche concernant la symétrie entre les membres inférieurs lors de différents exercices pour des sujets ayant subi une blessure du ligament croisé antérieur. Les tests ont été réalisés dans des conditions normales et dans des conditions de fatigue. Leur but était de mettre au point un ensemble de tests représentatif pour juger l'état de récupération des performances après une blessure du ligament croisé antérieur et après une reconstruction chirurgicale de ce même ligament. Une recherche de Behrens et al.¹² suggère quant à elle que la fatigue musculaire peut être un facteur de risque de lésions du ligament croisé antérieur. Le protocole de fatigue utilisé dans cette étude modifie le temps de latence et l'amplitude des réponses réflexes des muscles ischio-jambiers chez les femmes. Nous pouvons donc nous demander si un tel protocole a également une influence sur la répartition de la charge sur les deux jambes. A partir de cela, nous allons réaliser nos propres tests afin de voir si notre hypothèse se confirme.

¹¹ (Gustavsson et al., 2006)

¹² (Behrens, Mau-Moeller, Wassermann, & Bruhn, 2013)

Les objectifs principaux de ce travail sont la mise en évidence des différences de charges au niveau des membres inférieurs lors d'exercices de sauts et de force. Nous établirons une comparaison entre les performances de sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur et celles d'un groupe contrôle. Nous analyserons également la performance des sujets lors de sauts sur une jambe pour quantifier la stabilité du genou. L'influence d'une fatigue musculaire maximale sur la performance des sujets aux différents tests pourra ainsi être déterminée.

3. Approche théorique

3.1 Anatomie du genou

Le genou est une articulation complexe, composée d'une articulation bi-condylienne entre le fémur et le tibia, et d'une articulation trochléenne entre le fémur et la rotule. Cette articulation est d'une grande importance, non seulement pour son utilité pour la marche, mais aussi pour le soutien du poids du corps. C'est donc une articulation mobile et résistante, qui doit rester stable tout en étant souple¹³. Le genou permet des mouvements de flexion et d'extension, ainsi que des mouvements de rotations interne et externe de la jambe.

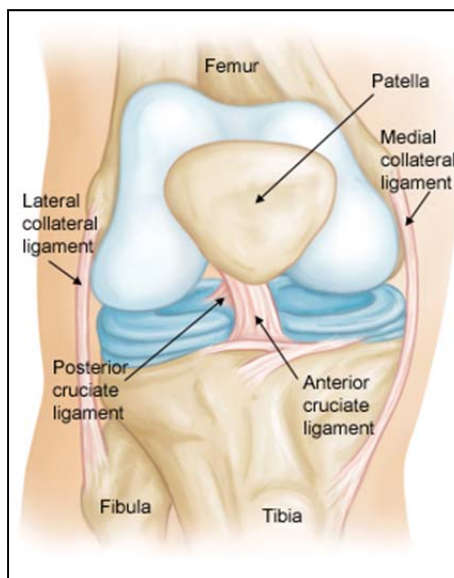


Figure 1 : Vue frontale de l'articulation du genou, source internet : <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00549>

L'articulation du genou est constituée de trois os : le fémur, le tibia, et la rotule. Les muscles de la jambe lui permettent de se mettre en mouvement. Les principaux acteurs de ces mouvements sont, pour la flexion, les ischio-jambiers, pour l'extension, les muscles du quadriceps, pour l'exorotation, le biceps fémoral, et pour l'endorotation, les muscles semi-tendineux et semi-membraneux¹⁴.

¹³ www.genou.com/Anatomiegenou.htm

¹⁴ (Faller, Sprumont, & Schünke, 2006)

Les ligaments, qui servent à maintenir la stabilité de l'articulation, sont des tissus conjonctifs très résistants. On compte le ligament collatéral fibulaire, et le ligament collatéral tibial, qui servent à la stabilité latérale, ainsi que les ligaments croisés antérieur et postérieur, qui maintiennent principalement l'articulation d'avant en arrière, mais qui jouent aussi un rôle dans la stabilité latérale¹⁵.

Les ménisques sont situés entre le tibia et le fémur, et sont composés d'un cartilage fibreux. Ce sont de petits coussinets en forme de croissant de lune, qui servent à amortir le contact entre les cartilages osseux. Ils permettent aussi une répartition optimale des charges dans l'articulation et améliorent la congruence entre les os, car les surfaces du fémur et du tibia ne sont pas idéalement complémentaires¹⁶.

La capsule articulaire du genou est une sorte de gaine fibreuse qui entoure l'articulation. Le cartilage qui recouvre les os permet aux surfaces articulaires de glisser parfaitement les unes sur les autres. Une fluidité dans les mouvements du genou est ainsi possible. Le cartilage se nourrit de synovie, liquide articulaire produit par la membrane synoviale qui tapisse la capsule articulaire du genou¹⁷.

¹⁵ <http://www.centredugenou.com/2-capsule-lanatomie-et-la-fonction-du-genou.html>

¹⁶ <http://www.centredugenou.com/2-capsule-lanatomie-et-la-fonction-du-genou.html>

¹⁷ <http://doc.doc.pagesperso-orange.fr/genou.htm>

3.1.1 Le ligament croisé antérieur

Le ligament croisé antérieur forme, avec le ligament croisé postérieur, le pivot central du genou¹⁸. Le ligament croisé antérieur assure la stabilité du genou d'avant en arrière, et lors des rotations. Il empêche un trop fort déplacement vers l'avant du tibia par rapport au fémur, appelé mouvement de tiroir antérieur¹⁹. Il s'oppose également à la rotation interne du tibia par rapport au fémur lors des mouvements rotatifs grâce à son enroulement avec le ligament croisé postérieur.

La rupture du ligament croisé antérieur intervient lors d'une torsion du genou, par exemple à ski, au football ou dans les sports de stops and go, lorsque le corps pivote mais que le pied reste fixé au sol. Cette rupture se manifeste parfois par un craquement, et une douleur aiguë se fait sentir.

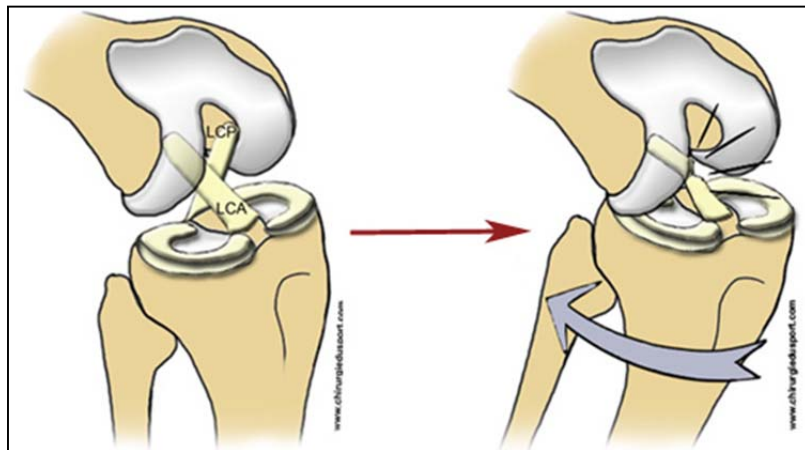


Figure 2 : Rupture du ligament croisé antérieur, source internet : <http://chirurgiedusport.com>

¹⁸ <http://doc.doc.pagesperso-orange.fr/genou.htm>
¹⁹ www.genou.com/lcaanatomie.htm

3.2 Opération du ligament croisé antérieur

Il existe deux solutions possibles après une rupture du ligament croisé antérieur : la reconstruction chirurgicale et le traitement conservateur, visant à renforcer la musculature de la jambe pour stabiliser l'articulation²⁰. Etant donné que, dans ce travail, nous n'analyserons que des sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur, il est important de nous intéresser à cette intervention.

La méthode la plus couramment utilisée lors de plastie du ligament croisé antérieur est l'autogreffe tendineuse, pratiquée soit à partir du tiers médian du tendon rotulien, soit grâce aux tendons du droit interne et du semi-tendineux, qui sont deux muscles de la patte d'oie²¹. Une autre méthode, moins courante, est l'allogreffe tendineuse, qui consiste en une greffe de ces mêmes tissus organiques, mais qui sont cette fois-ci prélevés sur un donneur.

La plastie par autogreffe du tendon rotulien se déroule de la manière suivante²² : Le tiers médian du tendon est prélevé avec des attaches osseuses d'environ 1.5 cm dans le tibia et la rotule. Le greffon est donc composé de deux bouts d'os qui entourent un tendon. Le chirurgien perce ensuite deux tunnels : un au niveau de l'insertion ligamentaire de l'ancien ligament croisé antérieur dans le tibia, et l'autre à un endroit précis du fémur, déterminé durant l'opération pour que la greffe ait la tension nécessaire à la bonne stabilité du genou. Le greffon est alors placé dans les deux tunnels et fixé par une vis au niveau du tunnel fémoral. Il est alors tendu, et testé par le chirurgien, puis il est fixé par une vis au niveau du tunnel tibial. Le déroulement de l'opération se fait sous contrôle arthroscopique.

²⁰ (Farshad et al., 2011)

²¹ www.orthopale.org/ligament-croise-anterieur.php

²² [http://chirurgiedusport.com/Traitements-GENOU-Ligament-Operation__du_ligament_croise_anterieur_\(LCA\)__DIDT_ou_KJ-f-4-c-2336-sc-16-a-760045.html](http://chirurgiedusport.com/Traitements-GENOU-Ligament-Operation__du_ligament_croise_anterieur_(LCA)__DIDT_ou_KJ-f-4-c-2336-sc-16-a-760045.html)

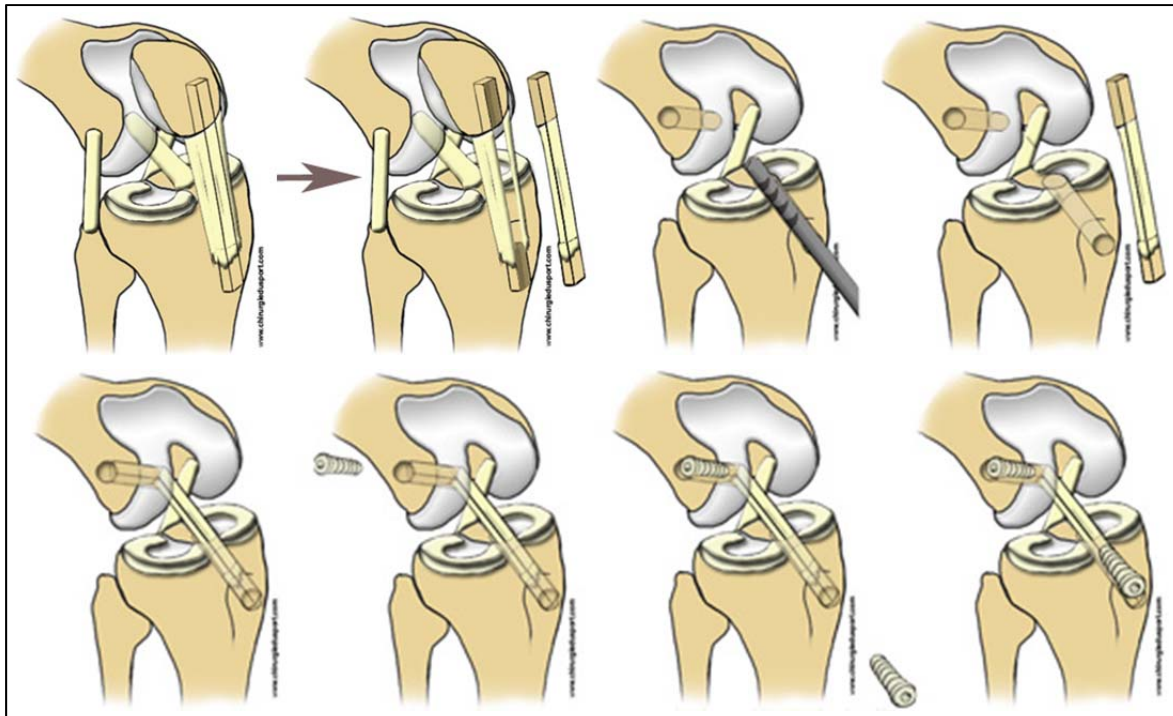


Figure 3 : Représentation schématique d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur par autogreffe du tendon rotulien, source internet : <http://chirurgiedusport.com>

La différence principale entre une plastie de tendon rotulien et une plastie des tendons de la patte d'oie réside en la nature du greffon. Le greffon obtenu grâce aux tendons de la patte d'oie, constituée du semi-tendineux et du droit interne, est formé d'une boucle à quatre brins. En effet, les deux tendons sont assemblés et pliés en deux, ce qui rend alors le greffon plus solide que le ligament croisé antérieur ne l'était auparavant. La suite de l'opération est similaire, puisque le greffon est lui aussi inséré dans les tunnels fémoral et tibial, tendu et testé, puis fixé par des vis.

Cependant, le choix d'opérer ou non un genou ayant subi une rupture du ligament croisé antérieur est délicat et ne va pas toujours de soi. L'étude de Chalmers et al.²³ s'intéresse à cette question. Les observations à long terme se sont concentrées sur la stabilité du genou, les résultats fonctionnels, la nécessité d'une nouvelle intervention chirurgicale et les résultats radiographiques pour une maladie dégénérative de l'articulation. Les seuls résultats concluants de cette recherche ont été la faible incidence de nouvelle blessure pour les sujets qui avaient subi une reconstruction chirurgicale, et l'amélioration du niveau d'activité pour ce même groupe.

Il est également intéressant de mettre en évidence les résultats de la recherche de Mathers et al.²⁴, qui compare les différences de coûts et d'efficacité entre une opération immédiate du ligament croisé antérieur, et un traitement conservateur suivi d'une opération plus tardive. Le résultat a montré qu'une reconstruction précoce est plus efficace et aussi moins chère qu'une reconstruction tardive où différents risques sont encourus. La stratégie optimale du point de vue du système de santé de la société devrait donc être le choix d'une reconstruction chirurgicale immédiate du ligament croisé antérieur.

Dans les cas où l'opération est prescrite, nous avons expliqué que plusieurs possibilités de greffes sont proposées. Des chercheurs se sont intéressés aux influences du choix du greffon. Ainsi, dans une étude, Keays et al.²⁵ proposent une comparaison des résultats de performances à long terme entre une greffe du tendon rotulien et une greffe de tendons de la patte d'oie. Ils concluent que, dans les deux cas, les résultats sont satisfaisants, peu importe la greffe. Cependant, la reconstruction utilisant les tendons de la patte d'oie a permis d'améliorer le rendement fonctionnel de l'articulation. Elle a également montré une plus faible incidence de l'ostéoarthrite, dégénérescence du cartilage articulaire avec des changements annexes dans l'os sous-chondral et dans le tissu synovial.

L'étude de Xie et al.²⁶ montre les différences d'incidence de l'ostéoarthrite en fonction de la greffe effectuée. Peu de différences sont relevées au niveau du retour à l'activité, des tests fonctionnels et de l'échec de la greffe. Toutefois, des résultats en faveur de l'autogreffe des tendons de la patte d'oie ont été trouvés, puisque les patients qui avaient subi une greffe du tendon rotulien ont ressenti des douleurs à l'avant du genou et dans la position de genuflexion à cause de la cicatrice due au prélèvement du tendon. De plus, l'incidence de l'ostéoarthrite a été significativement plus élevée dans les groupes de reconstruction par autogreffe du tendon rotulien que dans les groupes de reconstruction par greffe des tendons de la patte d'oie.

Selon Barenus et al.²⁷, la prévalence reportée de l'ostéoarthrite varie entre 10% et 90% des personnes opérées. Les résultats finaux de leur recherche démontrent que l'ostéoarthrite atteint plus régulièrement le compartiment médial du genou opéré, avec 57% des cas pour la jambe opérée, contre 18% des cas pour la jambe saine. Pour cette étude, contrairement à Xie et al., aucune différence d'incidence n'a été notée entre les différents types de greffes.

²⁴ (Mather et al., 2014)

²⁵ (Keays et al., 2007)

²⁶ (Xie et al., 2014)

²⁷ (Barenus et al., 2014)

3.3 Réhabilitation après une reconstruction du ligament croisé antérieur

3.3.1 Phases de réhabilitation immédiate

Selon le cours de Luzia Kalberer, en Physiothérapie et Médecine du sport, à la Haute Ecole Fédérale de Sport de Macolin, il y a quatre phases de réhabilitation après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur²⁸. Pour passer d'une phase à la suivante, différents critères doivent être remplis.

La première phase de réhabilitation, « Post operative recovery », consiste en un temps de repos, avec de la physiothérapie qui vise à mobiliser le membre et à améliorer la capacité à charger la structure blessée. C'est la phase de récupération post-opératoire.

De bons résultats aux tests cliniques et fonctionnels permettent au patient de passer à la phase suivante, appelée « Prepare to train », qui est une phase de préparation à l'entraînement et qui fait le lien entre la réhabilitation et l'entraînement. Cette phase est constituée de physiothérapie visant à une reconstruction musculaire pour retrouver les capacités à l'entraînement.

Des tests cliniques, fonctionnels, et une évaluation subjective permettent ensuite au patient de passer à la troisième phase. Celle-ci, nommée « Train to perform », consiste en un entraînement afin de se remettre au sport. Elle vise à récupérer les capacités de performances et une qualité du mouvement, grâce à un entraînement individuel de force, d'endurance, de coordination et de vitesse, et avec un entraînement léger avec l'équipe.

De bons résultats aux tests fonctionnels, aux tests de force, et à l'évaluation subjective permettent alors au patient d'atteindre la dernière phase de réhabilitation, à savoir la phase d'entraînement visant à un retour à la compétition, nommée « Train to compete ». Cette dernière phase permet au patient de récupérer toutes ses capacités afin d'être compétitif.

Pour terminer complètement la réhabilitation et recommencer le sport au même niveau qu'avant, le patient doit atteindre un score minimal de 90 points sur 100 sur l'échelle de retour à la compétition. Cette échelle, appelée « Return to competition score », comprend plusieurs tests qui ont chacun des coefficients différents : un test de force (coefficient 35%), un test fonctionnel (coefficient 35%), une analyse de la qualité de mouvement de l'articulation (coefficient 10%), une évaluation subjective (coefficient 10%), et un test clinique (coefficient 10%).

²⁸ (Kalberer, Meyer, & Gojanovic, 2013)

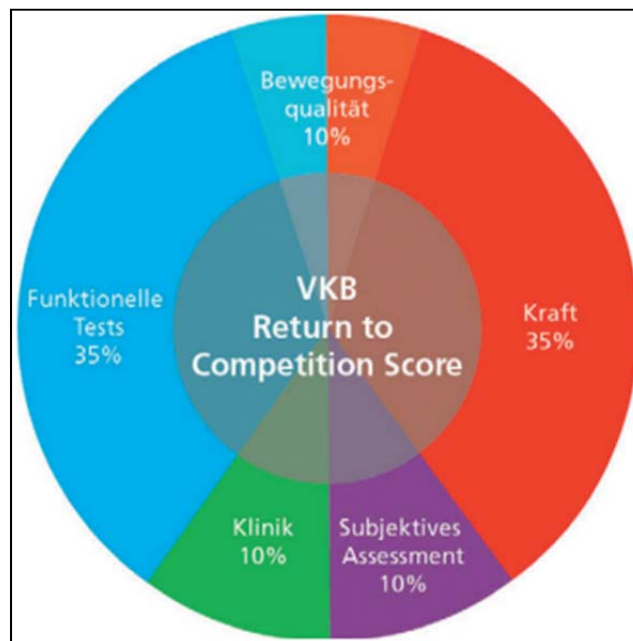


Figure 4 : Graphe des coefficients de l'échelle de retour à la compétition, (Kalberer, Meyer, & Gojanovic, 2013)

Le test de force prend en compte la force maximale isocinétique en chaîne ouverte, avec une vitesse angulaire de 60° par seconde pour les fléchisseurs et les extenseurs du genou. Il enregistre également la force explosive en chaîne fermée, sous forme d'exercices de squat jump, de counter movement jump et de sauts à une jambe. La force maximale isométrique à une jambe est déterminée lors d'une flexion du genou de 80°. Le test fonctionnel comprend différentes formes de sauts et un test d'agilité qui comparent les résultats de la jambe opérée avec ceux de la jambe saine. Il calcule la distance de saut sur une jambe et du triple saut croisé sur une jambe. Il mesure aussi la stabilité du genou lors d'un atterrissage de saut sur un pied. Un test d'équilibre sur une plateforme instable fait également partie de ce test fonctionnel. L'analyse de la qualité de mouvement de l'articulation se focalise sur le contrôle de l'axe de la jambe et de la stabilité du genou au cours du test fonctionnel. La qualité de mouvement est évaluée sur une échelle de 1 à 10, selon des critères prédéterminés. L'évaluation subjective de l'athlète est déterminée par un questionnaire qui comprend des questions sur ses activités sportives pour enregistrer les symptômes et les problèmes lors de l'entraînement spécifique au sport. Le test clinique comprend une appréciation de la douleur, de l'épanchement et de la mobilité. Les données concernant la douleur sont recueillies à l'aide d'un questionnaire. L'épanchement est enregistré après une certaine distance de course, et la mobilité du genou est testée en extension et en flexion.

3.3.2 Réhabilitation à long terme

Il existe peu de recherches à long terme sur la réhabilitation après une reconstruction du ligament croisé antérieur. Il est cependant intéressant de mentionner celles qui ont été menées sur ce sujet. Ainsi, dans leurs recherches, Tengman et al.²⁹ ont découvert que, 20 ans après l'opération, les sujets opérés ont démontré un score inférieur de fonctionnalité du genou par rapport au groupe contrôle. Leur jambe opérée était également moins performante que leur jambe saine, et que les résultats du groupe contrôle dans des exercices de sauts. La deuxième partie de cette étude³⁰ s'intéressait aux conséquences à long terme de la rupture du ligament croisé antérieur sur la force musculaire du genou. La comparaison de la force musculaire maximale entre les deux jambes et avec des sujets sains démontre un déficit de force musculaire pour la jambe blessée 20 ans après l'opération. En effet, la force maximale concentrique et excentrique à l'extension du genou était environ 10% inférieure pour la jambe blessée par rapport aux résultats obtenus par la jambe saine, qui étaient égaux à ceux du groupe contrôle. On peut en conclure qu'une blessure du ligament croisé antérieur peut conduire à une réduction persistante de la force maximale de la jambe blessée.

Oiestad et al.³¹ proposent une étude à long terme sur des éventuels changements dans les tests fonctionnels du genou et des résultats radiologiques 10 à 15 ans après une rupture du ligament croisé antérieur. La recherche compare les résultats obtenus pour un groupe ayant subi une lésion ligamentaire isolée, et un autre groupe ayant subi des dommages supplémentaires au niveau des ménisques ou du cartilage. D'après eux, une amélioration globale des résultats fonctionnels du genou a été détectée entre six mois et 10 à 15 ans après la reconstruction du ligament croisé antérieur pour les deux groupes. Toutefois, la prévalence de l'ostéoarthrite du genou était significativement plus élevée pour le groupe qui avait eu une blessure combinée.

²⁹ (Tengman, Brax Olofsson, Nilsson, et al., 2014)

³⁰ (Tengman, Brax Olofsson, Stensdotter, Nilsson, & Hager, 2014)

³¹ (Oiestad et al., 2010)

3.4 Symétrie des charges

D'après l'article de Chmielewski³², la répartition des charges est déséquilibrée après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur. Une asymétrie des charges au niveau des membres inférieurs est la plupart du temps marquée par une réduction des charges sur le côté opéré, qui peut mener à une nouvelle blessure. On remarque sur le tableau tiré d'un autre article de Chmielewski³³ que la différence est la plus marquée directement après l'opération pour les sujets ayant subi une reconstruction chirurgicale. Ceci est dû au fait que le repos imposé au sportif après l'opération entraîne une diminution de la masse musculaire. De plus, lors d'une plastie par greffe du tiers médian du tendon rotulien, le tendon est prélevé devant la rotule et peut donc engendrer des douleurs supplémentaires ainsi que des difficultés lors de la réhabilitation.

Tableau 1 : Résultats du test de charge à différents angles de flexion du genou, (Chmielewski et al., 2002)

Table 1 Percentage of body weight borne by the right leg (healthy subjects) or involved leg (ACLD and ACLR subjects) at various knee angles					
	Healthy	ACLD	ACLR		
			1 week post-operative	6 weeks post-operative	12 weeks post-operative
WB 0° (% BW)	51.75 ± 7.10	47.80 ± 3.16	48.60 ± 3.41	51.10 ± 2.47	52.10 ± 3.35
WB 30° (% BW)	51.30 ± 7.30	48.80 ± 4.49	47.50 ± 6.64	51.70 ± 3.27	52.30 ± 2.98
WB 60° (% BW)	51.27 ± 7.40	50.50 ± 4.53	48.30 ± 5.01	48.60 ± 4.67	51.90 ± 3.78
WB 90° (% BW)	49.50 ± 6.20	49.50 ± 3.41	43.10 ± 5.86 ^a	49.00 ± 3.92	49.80 ± 4.87

^a Differs from healthy and ACLD subjects ($P < 0.05$).

Parfois, après une opération du ligament croisé antérieur, la symétrie est maintenue. Cependant, elle est due à des compensations qui peuvent donc elles aussi mener à un risque de blessure³⁴. En effet, différentes compensations peuvent survenir après une opération du ligament croisé antérieur : un faible moment d'extension interne du genou est compensé par un haut moment d'extension interne de la hanche ou de la cheville, alors qu'une faible force verticale du côté opéré engendre une augmentation du poids supporté par la jambe non opérée. De même, Ernst et al.³⁵ ont obtenu des résultats similaires dans leur recherche, en remarquant que le moment d'extension du genou de la jambe opérée était inférieur à celui de la jambe saine et aux résultats obtenus par le groupe contrôle dans des exercices de lateral steps up, et de décollage et d'atterrissage de sauts

³² (Chmielewski, 2011)

³³ (Chmielewski et al., 2002)

³⁴ (Chmielewski, 2011)

³⁵ (Ernst, Saliba, Diduch, Hurwitz, & Ball, 2000)

verticaux. Le moment d'extension total de la jambe opérée était lui aussi inférieur aux autres résultats lors de l'atterrissage du saut vertical, mais il est resté égal aux résultats de la jambe saine et du groupe contrôle durant les exercices de lateral steps up et de décollage du saut vertical. Ces résultats suggèrent que les extenseurs de la hanche ou de la cheville peuvent compenser un déficit du moment d'extension du genou. La diminution du moment d'extension total de la jambe opérée lors de l'atterrissage du saut vertical représente quant à lui une atténuation insuffisante des forces d'atterrissage, ce qui peut exposer les structures squelettiques et les articulations à des blessures.

Si l'on s'intéresse aux conséquences liées à une charge asymétrique des membres inférieurs, on peut mentionner tout d'abord une augmentation du risque de récurrence de blessure sur le membre opéré ou une blessure sur le côté non opéré. Ainsi l'équipe de chercheurs de Hewett et al.³⁶ a remarqué qu'une charge asymétrique frontale plane au niveau du genou augmente le risque de nouvelle blessure du ligament croisé antérieur chez les athlètes féminines. L'équipe de Paterno et al.³⁷, quant à elle, a trouvé que l'amplitude de l'asymétrie du moment d'extension interne du genou au contact initial du drop jump vertical était l'une des causes d'une deuxième blessure du ligament croisé antérieur. Chmielewski³⁸, quant à elle, stipule qu'une autre conséquence de l'asymétrie des charges sur les membres inférieurs est le développement d'ostéoarthrite post-traumatique du genou. Il peut paraître surprenant qu'une charge diminuée sur le côté opéré entraîne l'apparition d'ostéoarthrite post-traumatique, puisque c'est habituellement une charge excessive sur les cartilages articulaire qui favorise sa formation. Cela est dû au fait que les charges réduites altèrent la synthèse des chondrocytes, les cellules du cartilage, ainsi que l'activité catabolique en changeant la composition biochimique du cartilage articulaire et en le rendant structurellement plus faible. La charge réduite affecte aussi la production des cytokines, qui régulent l'activité des chondrocytes. Il est donc inquiétant de voir qu'une charge asymétrique dans les premières phases de réhabilitation après une reconstruction du ligament croisé antérieur puisse endommager le cartilage articulaire. A cause de ces dommages, les forces plus importantes subies plus tard durant la réhabilitation seraient donc nuisibles pour l'articulation.

L'évaluation et le traitement d'une asymétrie des charges au niveau des extrémités inférieures n'est pas encore complètement au point d'un point de vue clinique³⁹. En effet, il

³⁶ (Hewett et al., 2005)

³⁷ (Paterno, Ford, Myer, Heyl, & Hewett, 2007)

³⁸ (Chmielewski, 2011)

³⁹ (Chmielewski, 2011)

est difficile d'observer les forces en jeu. De plus, le matériel technique pour l'enregistrement des données, comprenant des plateformes de forces et un système de capture de mouvement, n'est pas très courant, et il nécessite des techniciens particuliers pour le faire fonctionner. Un autre problème pour le recueil de telles données est le manque de données normatives, provenant d'un groupe contrôle. En effet, il serait intéressant de pouvoir comparer les résultats des sujets blessés aux résultats obtenus par des sujets sains⁴⁰.

La définition de la symétrie entre les membres est aussi un point important. L'indice de symétrie des membres est donné par l'équation [côté opéré / côté non opéré] x 100⁴¹. Il sert à quantifier l'asymétrie dans différentes performances. Une diminution de l'asymétrie peut être expliquée par une augmentation de performances du côté opéré, une diminution de performances du côté non opéré ou encore une augmentation des deux côtés avec un gain relativement plus grand du côté opéré. Il est alors nécessaire de déterminer un seuil dans l'asymétrie afin de faciliter l'analyse clinique. En effet, une charge complètement symétrique est probablement irréaliste, même chez les sujets sains. Il faut donc se demander quel est le niveau d'asymétrie acceptable, et si celui-ci diffère selon les activités. On peut aussi déterminer quel niveau d'asymétrie dans la force du quadriceps et dans la performance de saut sur une jambe est acceptable pour poursuivre la réhabilitation et pour retourner aux activités sportives. Des chercheurs se sont penchés sur la question et affirment qu'un rapport entre les deux membres de 85% ou plus est considéré comme cliniquement normal. En effet, dans leur étude, Barber et al.⁴² stipulent qu'il n'y a pas de signification statistique entre les performances des membres inférieurs, selon le type d'activité, le niveau, le genre, ou le côté dominant. Cela a permis de déterminer un indice global de symétrie pour l'ensemble de la population. Ainsi, pour 90% de la population normale, un indice de symétrie de 85% a été relevé lors des différents tests de sauts sur une jambe.

⁴⁰ (Chmielewski, 2011)

⁴¹ (Chmielewski, 2011)

⁴² (Barber, Noyes, Mangine, McCloskey, & Hartman, 1990)

3.5 Mesures de sauts, de force et de stabilité du genou

Le protocole de cette recherche inclut des tests de sauts, de force, ainsi qu'une analyse subjective de la stabilité du genou et s'est inspiré de différentes études précédemment portées sur le sujet.

Ainsi, dans l'article de Chmielewski et al.⁴³, différents tests sont effectués à l'aide de plateformes de forces, afin de mesurer des différences de charges entre les deux jambes chez des patients ayant subi une blessure du ligament croisé antérieur. Dans sa recherche, quatre tests qui se rapprochent d'une activité quotidienne et qui sont facilement envisageables dans un programme clinique sont proposés. Les tests mesurent la charge des jambes avec des plateformes de forces. Le premier test enregistre la charge statique à 0°, 30°, 60° et 90° de flexion du genou. Un autre test mesure l'équilibre sur une jambe. Le troisième test mesure la charge lors d'un exercice qui consiste à se relever d'une position assise et le dernier test enregistre la charge lors de l'enjambement d'une marche. Neitzel et al.⁴⁴ ont déterminé si les individus ayant subi une reconstruction du ligament croisé antérieur démontraient une réponse à la charge égale sur leurs membres inférieurs lors de squats parallèles. Pour ce faire, ils ont utilisé des capteurs placés dans les chaussures des participants, afin de relever la charge de chaque jambe pendant les exercices. Les sujets ont alors effectué trois séries de neuf squats aléatoires, à 30°, 60° et 90° de flexion du genou, avec différents poids ajoutés. Ces tests, ainsi que l'utilisation des plateformes de forces, ont inspiré les différents tests de notre recherche.

Concernant la stabilité du genou, Padua et al.⁴⁵ proposent un test appelé « Landing Error Scoring System » qui consiste en un outil qui identifie de manière fiable si les individus ont un risque de rupture du ligament croisé antérieur. Cet outil utilise un test de drop jump, avec enregistrement vidéo des plans frontal et sagittal lors de l'exécution de l'exercice. Le score de Landing Error Scoring System est ensuite établi lors de la rediffusion des extraits vidéo, avec une analyse cinétique et cinématique tridimensionnelle. Les sujets qui présentent un haut score de Landing Error Scoring System ont une mauvaise technique d'atterrissage, alors qu'un score faible est synonyme d'une excellente technique d'atterrissage. Ce système d'analyse a été validé statistiquement. Nous nous sommes donc inspirées de ce test pour noter subjectivement la stabilité du genou des participants lors d'un saut vertical sur une jambe.

⁴³ (Chmielewski et al., 2002)

⁴⁴ (Neitzel et al., 2002)

⁴⁵ (Padua et al., 2009)

3.6 Fatigue musculaire et asymétrie

Selon Edwards⁴⁶, « la fatigue musculaire correspond à l'incapacité de maintenir à un niveau requis ou prédéterminé, la force ou la puissance développée, durant des contractions soutenues ou répétées. »

Plusieurs articles portent leur attention sur les résultats de performances dans un état sans fatigue et après une fatigue musculaire. Ainsi, Orishimo et Kremenich⁴⁷ ont analysé les effets de la fatigue musculaire sur la performance d'atterrissage de saut à une jambe. Les résultats de leur recherche ont démontré que les mouvements de flexion du genou, de la cheville et de la hanche sont modifiés lors de l'essai après l'influence de la fatigue musculaire. De tels ajustements sont effectués afin de maintenir la stabilité de l'extrémité inférieure lors de l'atterrissage malgré un déficit dû à la fatigue et perçu au niveau du genou. Une augmentation de l'amplitude totale du mouvement du genou est également constatée avec l'effet de la fatigue. Ceci s'explique par le fait qu'il faut plus de temps à l'articulation fatiguée pour ralentir le centre de masse lors de l'atterrissage. Toutes ces compensations peuvent indiquer des adaptations de protection pour éviter de surcharger le genou reconstruit.

Une autre étude a montré que la fatigue du quadriceps et des ischio-jambiers a un effet sur le temps de réaction et sur la translation tibiale antérieure. Effectivement, Wojtys et al.⁴⁸ ont découvert une augmentation moyenne de 32,5% dans la translation tibiale antérieure après la fatigue. Par conséquent, ils suggèrent que la fatigue peut jouer un rôle important dans les blessures du genou dans les sports physiquement exigeants. Il semblerait également que l'ordre de recrutement des fibres musculaires ne soit pas modifié après la fatigue. Cependant, le temps de réaction musculaire est ralenti après la fatigue.

McLean et son équipe⁴⁹ ont effectué des tests de drop jump sur des athlètes hommes et femmes, en enregistrant la cinétique et la cinématique 3D lors des sauts. Les tests ont été effectués en pré-tests, dans un état normal, puis en post-test, dans un état de fatigue. Les résultats de cette recherche ont démontré que la fatigue a un effet plus marqué chez les femmes lors du drop jump. Les modifications induites par la fatigue dans le contrôle des membres inférieurs peuvent augmenter le risque de lésion du ligament croisé antérieur sans contact lors de l'atterrissage.

⁴⁶ <http://www.preparation-physique.net/physiologie-staps/233.html>

⁴⁷ (Orishimo & Kremenich, 2006)

⁴⁸ (Wojtys, Wylie, & Huston, 1996)

⁴⁹ (McLean et al., 2007)

Dans une recherche menée en deux temps, Orishimo et al.⁵⁰ et Liederbach et al.⁵¹ ont tout d'abord identifié des différences dans la biomécanique d'atterrissage de saut entre les danseurs et les athlètes de sports d'équipe. Ainsi, lors de l'exécution d'un atterrissage de 30 cm, les athlètes féminines de sport d'équipe ont montré un plus important valgus du genou que le groupe de danseuses et les groupes masculins d'athlètes et de danseurs. Ensuite, les chercheurs se sont penchés sur la question de la fatigue et de son rôle dans les différences de performances lors des tâches d'atterrissage pour les athlètes de sport d'équipe et les danseurs. Dans tous les cas, les danseurs, comme les athlètes, ont montré des paramètres d'alignement d'atterrissages modifiés sous l'influence de la fatigue, avec un risque plus élevé de blessure du ligament croisé antérieur, mais la modification était moins importante chez les danseurs. La formation approfondie en technique d'atterrissage et la pratique quotidienne qu'ils subissent à partir d'un jeune âge peut expliquer l'incidence plus faible de lésions du ligament croisé antérieur pour ce groupe. Nous pouvons donc affirmer qu'une formation particulière peut mener à de meilleurs résultats pour des performances d'atterrissages. De plus, nous savons que, pour des athlètes peu entraînés, la fatigue a une influence particulière sur la biomécanique d'atterrissage.

Gehring et al.⁵² ont conduit une recherche concernant d'une part l'influence du genre, et d'autre part l'influence de la fatigue sur la performance. Ainsi, entre les premières et deuxièmes mesures d'un exercice d'atterrissage à pieds joints, un protocole de fatigue a eu lieu. La fatigue a été induite en utilisant un protocole de fatigue sous-maximale dans une legpress. Cet exercice a été choisi car il correspond à des mouvements de flexion et d'extension du genou en chaîne cinétique fermée en corrélation avec d'autres protocoles de fatigue fonctionnels. De plus, cet exercice permet de définir un critère de fin clair, à partir du moment où les participants sont à bout de forces. Les sujets ont dû passer, par un mouvement de va-et-vient, d'une flexion des jambes de 90° à une extension complète dans la legpress, avec un poids de 50% de la charge maximale. Les exercices se sont poursuivis jusqu'à ce que les sujets ne puissent plus effectuer de mouvement avec la charge sélectionnée. Les résultats de cette recherche ont montré que lors de l'atterrissage, à 200 ms après le contact des pieds au sol, les angles maximaux de flexion du genou ont été augmentés avec la fatigue. Une autre influence de la fatigue est représentée par une diminution des intégrales de pré-activation pour le muscle biceps fémoral, pour le semi-tendineux et pour le gastrocnémien.

⁵⁰ (Orishimo, Liederbach, Kremenich, Hagins, & Pappas, 2014)

⁵¹ (Liederbach, Kremenich, Orishimo, Pappas, & Hagins, 2014)

⁵² (Gehring, Melnyk, & Gollhofer, 2009)

Augustsson et al.⁵³ ont également mené une étude sur la performance de saut à une jambe avec influence de la fatigue. Le test consistait à effectuer un saut sur une jambe aussi loin que possible. Il était mené en état normal, puis en état de fatigue, avec 50% de charge d'une répétition maximale et finalement avec 80% de charge d'une répétition maximale. L'exercice de fatigue musculaire était effectué à l'aide d'une legpress chargée au préalable avec une charge correspondant à 50% et 80% de la charge d'une répétition maximale. Le participant devait alors effectuer un mouvement de va-et-vient, d'une flexion de l'articulation de 90°, à l'extension complète. Le poids soulevé pour chaque mouvement a été incrémenté de 2,5 à 10 kg jusqu'à ce qu'intervienne la rupture. Les résultats montrent une diminution significative des performances après l'exercice de fatigue du muscle quadriceps à 50% et 80% de la charge d'une répétition maximale, par rapport aux performances du test sans fatigue.

Tableau 2 : Résultats du test de saut à une jambe, (Augustsson et al., 2006)

Table 1. Hop performance for test and retest under different test conditions (non-fatigued and following fatiguing exercise of the quadriceps muscle at 50% and 80% of 1 RM-strength) in healthy male subjects ($n = 11$)			
Quadriceps muscle 1 RM-strength (%)			
	Non-fatigued	80	50
Hop performance (cm)			
Test	169.4 \pm 20.4 ^{*,†}	152.6 \pm 20.2 [‡]	139.5 \pm 12.2
Retest	168.8 \pm 20.2 ^{*,§}	153.0 \pm 20.4 [*]	141.3 \pm 22.5

Values are expressed as means (\pm SD).

*Different from 50% quadriceps strength-hop condition, $P < 0.001$.

†Different from 80% quadriceps strength-hop condition, $P < 0.01$.

‡Different from 50% quadriceps strength-hop condition, $P < 0.01$.

§Different from 80% quadriceps strength-hop condition, $P < 0.001$.

RM, repetition maximum.

4. Méthode

4.1 Sujets

27 sujets âgés de 18 à 40 ans ont donné leur accord pour participer à cette étude. Parmi ces participants, 18 sujets, 11 femmes et sept hommes, ont subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur datant au minimum de deux ans. Les neuf sujets restant forment un groupe contrôle, qui compte quatre femmes et cinq hommes. Dans le groupe des participants opérés, dix se sont blessé la jambe dominante et sept la jambe secondaire. Le sujet opéré restant n'a pas de préférence entre les membres inférieurs. Il n'est donc pas intéressant de comparer ses résultats aux autres. Tous les sujets sont issus d'un milieu sportif et prennent part régulièrement à des activités physiques comprenant des sauts, des courses, des mouvements de pivot ou des stops and go. Les sujets ont reçu toutes les informations nécessaires au bon déroulement de la recherche et ont pu poser des questions. Ils ont ensuite signé un formulaire de consentement pour que la recherche se déroule en accord avec les règles d'éthique en vigueur.

4.2 Protocole

Cette recherche a été exécutée en parallèle avec la recherche du travail de Master d'une autre étudiante, Marie Bussard, et les tests ont été effectués simultanément. Cette façon de procéder a été choisie afin de compter un plus grand nombre de sujets et de leur éviter plusieurs rendez-vous au laboratoire.

La procédure complète comprend un test de sauts, de force et d'équilibre, qui est exécuté trois fois, avec une intervention sensorimotrice entre le premier et le deuxième test, et avec un exercice visant à une fatigue musculaire maximale du quadriceps entre le deuxième et le troisième test.

Tout d'abord, les participants ont reçu une demande d'intérêt pour la participation à cette recherche, avec une petite explication, par mail, bouche-à-oreille, réseau sociaux, etc. Après avoir répondu positivement à cette demande, ils ont reçu une note d'information détaillée ainsi qu'un lien doodle leur permettant d'inscrire leurs disponibilités pour les tests. Ils ont ensuite été convoqués pour la séance d'enregistrement des données. A leur arrivée, une brève clarification liée au protocole leur a été donnée. Ils ont alors pu poser toutes les questions qu'ils avaient au sujet de l'expérience. Avant de commencer les tests,

ils ont signé un formulaire de consentement. Ils ont alors pris part à la séance d'enregistrement des données durant laquelle ont eu lieu les trois séries de tests. Les résultats obtenus aux différents tests ont été enregistrés grâce au logiciel Imago Record. Ils ont ensuite été exportés dans un document Excel, puis ont été analysés avec le logiciel SPSS. L'analyse statistique a été utile pour mettre en évidence une éventuelle modification des performances obtenues entre le premier et le troisième test, qui peut être due à la fatigue. Étant donné que Marie s'est chargée d'analyser les résultats du premier et du deuxième test pour voir s'il existait une modification des performances due à l'entraînement, je ne m'étendrai pas sur les explications relatives à sa recherche.

4.3 Tests

Pour faire la comparaison des charges entre le membre opéré et le membre sain, différents tests ont été mis sur pieds. Ils comprennent des tests de sauts, des tests de force et une appréciation subjective de la stabilité du genou. Pour les tests de sauts et de force, deux plateformes de forces ont été utilisées, une pour chaque jambe, afin de connaître leur charge respective.

4.3.1 Tests de sauts

Les sujets effectuent deux tests de sauts différents : un test d'atterrissage sur les plateformes, à partir d'un élément de bois mesurant 50 cm de haut, et un test de drop jump, effectué depuis le même élément.

Pour le test d'atterrissage, le participant est debout sur la marche en bois. Il s'élance en contrebas pour atterrir à pieds joints, avec un pied sur chaque plateforme. L'atterrissage doit être contrôlé et se fait avec amorti, de façon à ne pas se blesser. Le pic de force maximale subi par chacune des plaques lors de l'atterrissage est alors enregistré par le logiciel. Le sujet remonte ensuite sur l'élément de bois et répète l'exercice de manière à avoir trois enregistrements de ses données.



Figure 5 : Atterrissage

Pour le drop jump, le participant est debout sur l'élément de bois. Il s'élance en contrebas pour rebondir à pieds joints aussi rapidement que possible. Le rebond s'effectue à nouveau avec un pied sur chaque plaque. Le sujet doit penser à rebondir le plus haut et le plus rapidement possible, car le contact au sol doit être le plus court possible. Il atterrit à nouveau avec un pied sur chaque plateforme et se stabilise. Il remonte ensuite sur la marche pour répéter l'exercice. Trois enregistrements des données sont également effectués pour cet exercice, et le pic de force maximale subi par chacune des plaques lors du rebond et de l'atterrissage est enregistré par le logiciel.



Figure 6 : Drop jump, vue de profil



Figure 7 : Drop jump, vue de face

4.3.2 Tests de force

Les tests de force visent à mettre en évidence une différence de force entre les deux jambes. Les participants effectuent trois tests différents : un test de force explosive sous forme de squats avec une barre de 7.5 kg sur les épaules, un test de force explosive sous forme de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée, et un test de force maximale. Ces tests se font sur les mêmes plateformes de forces que les tests de sauts. Pour ces tests, le sujet n'a pas besoin d'effectuer plusieurs répétitions de l'exercice, étant donné que la série comporte une vingtaine de squats, et propose donc suffisamment de données pour l'analyse.

Pour la série de squats avec la barre de 7.5 kg sur les épaules, le participant se tient debout, un pied sur chaque plaque. Au départ, il a les jambes légèrement fléchies et prend la barre sur ses épaules. Il doit alors effectuer une série de 20 à 25 squats en portant la barre, en suivant une fréquence imposée par le beeper au rythme d'un mouvement tous les huit dixièmes de seconde. Les plateformes de forces enregistrent les variations de la charge de chaque jambe durant l'intégralité de la série.



Figure 8 : Squats avec 7.5 kg de charge ajoutée

Pour la série de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée, le participant se tient à nouveau debout, un pied sur chaque plateforme. Il a les jambes légèrement fléchies et prend la barre chargée sur ses épaules. Il effectue alors une vingtaine de squats, à la même fréquence. Les plaques enregistrent les pics de force de chaque jambe pendant tout l'exercice.

Finalement, pour le dernier exercice, le participant doit déployer sa force maximale, en poussant le plus fort possible contre la barre qui reste immobile, fixée dans l'installation, à une hauteur adaptée. Pour ce faire, il est en position debout, les jambes mi-fléchies, les épaules appuyées contre la barre. Au beep, il doit pousser progressivement de toutes ses forces ses épaules contre la barre, comme s'il voulait la soulever. Durant cet exercice, il doit faire attention à bien contracter son dos et ses abdominaux pour ne pas se blesser. Pour cet exercice, le sujet doit à nouveau effectuer trois répétitions. Les plateformes recueillent la poussée verticale des jambes vers le bas, qui représente la force maximale exercée par les jambes durant l'exercice.



Figure 9 : Force maximale

4.3.3 Analyse subjective de la stabilité du genou

Une analyse subjective de la stabilité du genou est réalisée alors que le participant effectue un saut vertical avec atterrissage sur un pied. L'examineur est placé en face du sujet, le regard fixé sur son genou. Le participant effectue un saut avec les mains sur les hanches. Il prend l'élan avec ses deux jambes, saute le plus haut possible, puis atterrit sur un seul pied et se stabilise directement, sans mouvement supplémentaire. L'examineur attribue alors une note à la stabilité du genou au moment de l'atterrissage. Si le genou est très stable, il est quantifié par la note de 3, s'il est moyennement stable, par un 2, et s'il est instable, par un 1.



Figure 10 : Saut avec atterrissage sur une seule jambe

4.4 Fatigue musculaire maximale

Après la session de tests constituant la ligne de base, les participants doivent effectuer un exercice visant à une fatigue musculaire maximale du quadriceps. Cet exercice s'effectue à la legpress du fitness. Le participant charge la presse à un poids proche du poids de son corps. Il se met en place, les pieds contre la plaque verticale de la machine, pour que l'angle de ses genoux soit de 90°. Il se met alors à pousser la plaque de la presse jusqu'à l'extension quasi complète de ses jambes, puis relâche et revient à la position de départ. Il enchaîne alors les poussées en un mouvement de va-et-vient, sans jamais relâcher complètement ses muscles. Le sujet doit faire le plus de répétitions possible et pousser ses limites au maximum afin d'être très proche de la fatigue musculaire maximale impliquant une impossibilité de continuer. Lorsqu'il n'en peut vraiment plus, il revient rapidement à la salle d'expérimentation et se met directement en place pour le test de force maximale. Il effectue trois fois l'exercice de force maximale et enchaîne avec la série de squats chargé à 70% du poids du corps, puis avec la série de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée. Ces exercices sont effectués dans le sens inverse, afin de commencer par l'exercice le plus dur pour conserver l'état de fatigue maximale le plus longtemps possible. Il se place ensuite contre un mur en exercice immobile de chaise afin de conserver la fatigue pendant que les examinateurs mettent en place l'exercice suivant. Le participant peut ensuite se mettre en place sur l'élément de bois pour effectuer trois fois le drop jump, suivi du test d'atterrissage, répété lui aussi trois fois. Pour finir, il doit sauter trois fois en atterrissant sur un pied pour l'analyse subjective de la stabilité du genou sous l'influence de la fatigue.



Figure 11 : Fatigue musculaire maximale à la legpress

4.5 Séparation des groupes

Afin de pouvoir analyser les données de la meilleure manière possible, nous avons dû déterminer comment séparer les groupes de participants. La première solution aurait été de séparer les sujets opérés en deux groupes, un groupe ayant opéré la jambe gauche et l'autre la jambe droite. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les différences liées à la jambe d'appui qui peut varier selon les participants.

Une autre possibilité aurait été de définir les groupes en fonction de la jambe d'appui des participants, et de voir s'ils se sont blessé la jambe forte ou la jambe faible. Cependant, aucun test standardisé servant à déterminer la jambe d'appui d'une personne n'existe dans la littérature scientifique. En effet, nous savons qu'il est possible de voir cela en demandant au sujet de monter une marche et en regardant avec quel pied il monte en premier. Une autre possibilité est d'effectuer une poussée horizontale en avant de la personne pour voir avec quel pied elle se met en équilibre. Mais ces deux solutions ne sont pas prouvées scientifiquement.

Nous avons donc préféré nous référer à l'article de Stanley Coren⁵⁴ concernant la préférence latérale. En effet, en complétant un questionnaire de 16 étapes, nous pouvons analyser la préférence latérale pour l'agilité des mains, des pieds, des yeux et des oreilles. Chaque thème comprend quatre questions basiques. Concernant l'agilité des pieds, les questions sont les suivantes :

- Avec quel pied frapperais-tu une balle dans le but de viser une cible précise ?
- Si tu devais ramasser un caillou avec tes orteils, quel pied utiliserais-tu ?
- Quel pied utiliserais-tu pour écraser un insecte ?
- Si tu devais monter sur une chaise, avec quel pied monterais-tu en premier ?

Pour analyser les résultats de ce questionnaire, il suffit d'attribuer un point positif lorsque le côté droit est choisi, et un point négatif lorsque c'est le membre gauche qui est sélectionné. Si le sujet hésite et qu'il n'a pas de préférence, on ne lui attribue pas de point pour l'étape. Ainsi, lorsque l'on additionne les points obtenus par un sujet, on obtient sa préférence latérale. Un sujet est complètement droitier s'il obtient un score de +4, il est plutôt droitier s'il obtient un score compris entre +1 et +3, alors qu'il est complètement gaucher pour un score de -4 et plutôt gaucher pour un score allant de -1 à -3. Si un sujet obtient un score de 0, il n'a donc pas de préférence latérale et est considéré comme ambidextre.

⁵⁴ (Coren, 1993)

Nous avons donc posé les questions relatives à la préférence latérale liée aux membres inférieurs aux participants, et avons pu séparer nos sujets en trois groupes : un groupe de dix participants qui ont opéré leur jambe dominante, un groupe de sept participants qui ont opéré leur jambe secondaire et un groupe contrôle, de participants sains, classés selon leur jambe dominante.

4.6 Traitement et analyse statistique des données

Les résultats des tests ont été enregistrés avec le programme Imago Record, relié aux plateformes de forces. Les données ont ensuite été exportées dans des fichiers Excel, afin d'en calculer facilement les moyennes et les écarts-types.

Le logiciel SPSS a été utilisé pour l'analyse statistique des données. Il permet de mettre en évidence une différence significative de résultats entre les performances des participants lors de la première série de tests et lors de la série suivant la fatigue musculaire maximale. Une analyse de variance, ANOVA, a été réalisée. Celle-ci peut s'effectuer lorsqu'on a un minimum de deux groupes à comparer, et que les mesures sont quantitatives. Elle est utile pour comparer les moyennes des résultats obtenus par les différents groupes pour inférer une relation entre les tests effectués, l'effet de l'exercice de fatigue maximale, la jambe opérée ou non, et la préférence latérale. Lors d'une ANOVA, la valeur de P, autrement dit la signification, indique si la différence de moyenne entre les groupes est significative ou non. Pour que celle-ci soit significative, il faut que la valeur de P soit inférieure à 0.05. Lorsque c'est le cas, les différences sont suffisamment grandes pour conclure que les valeurs obtenues sont statistiquement utilisables et peuvent déboucher sur une discussion.

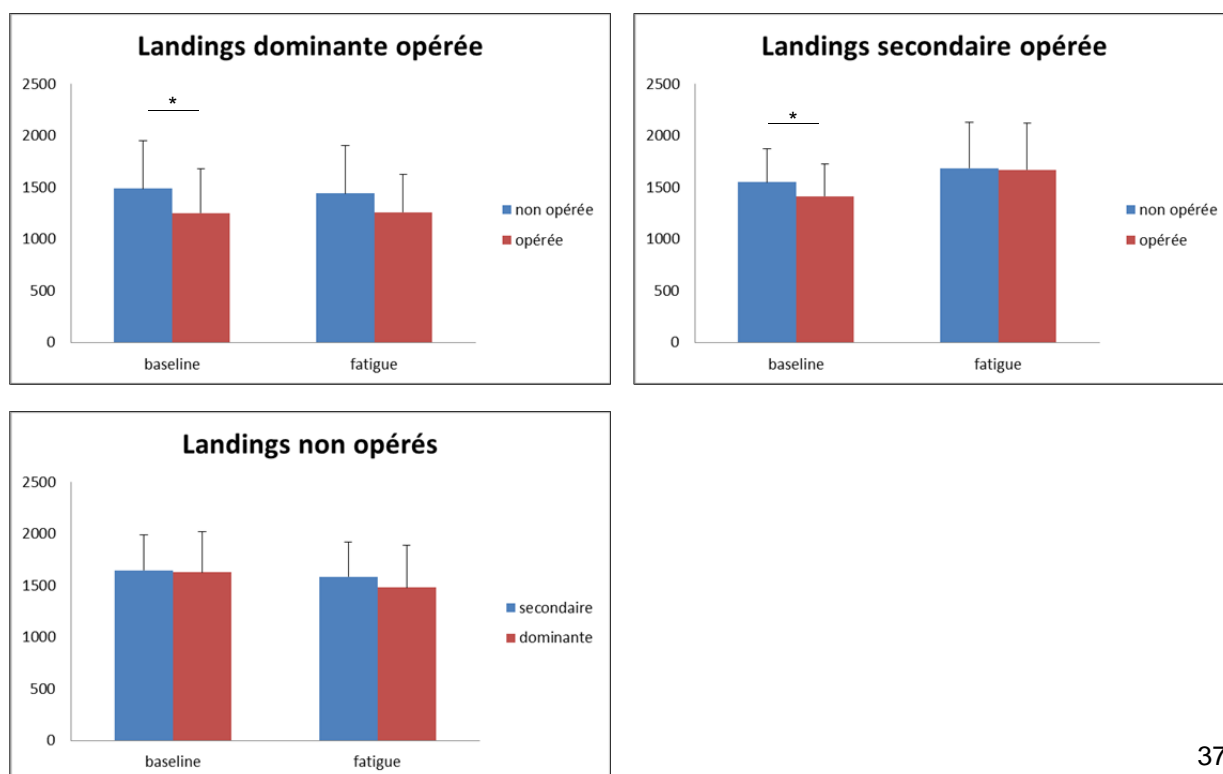
5. Résultats

5.1 Tests de sauts

Pour la ligne de base du test d'atterrissage, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1251.50 Newton (écart-type 464.52), alors qu'elle est de 1488.88 N (écart-type 425.43) pour la jambe saine. Pour le groupe ayant opéré la jambe secondaire, la moyenne lors du test d'atterrissage de la ligne de base est de 1413.76 N (écart-type 313.21) pour la jambe opérée, et de 1550.70 N (écart-type 326.31) pour la jambe saine. Enfin, pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 1625.32 N (écart-type 398.07), alors qu'elle est de 1645.38 N (écart-type 344.22) pour la jambe secondaire.

Pour le test d'atterrissage après fatigue maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1260.65 N (écart-type 368.24), et de 1441.92 N (écart-type 464.46) pour la jambe saine. Pour le groupe ayant opéré la jambe secondaire, la moyenne est de 1669.34 N (écart-type 454.87) pour la jambe opérée, et de 1685.82 N (écart-type 442.83) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 1480.71 N (écart-type 404.79), et de 1584.85 N (écart-type 336.36) pour la jambe secondaire.

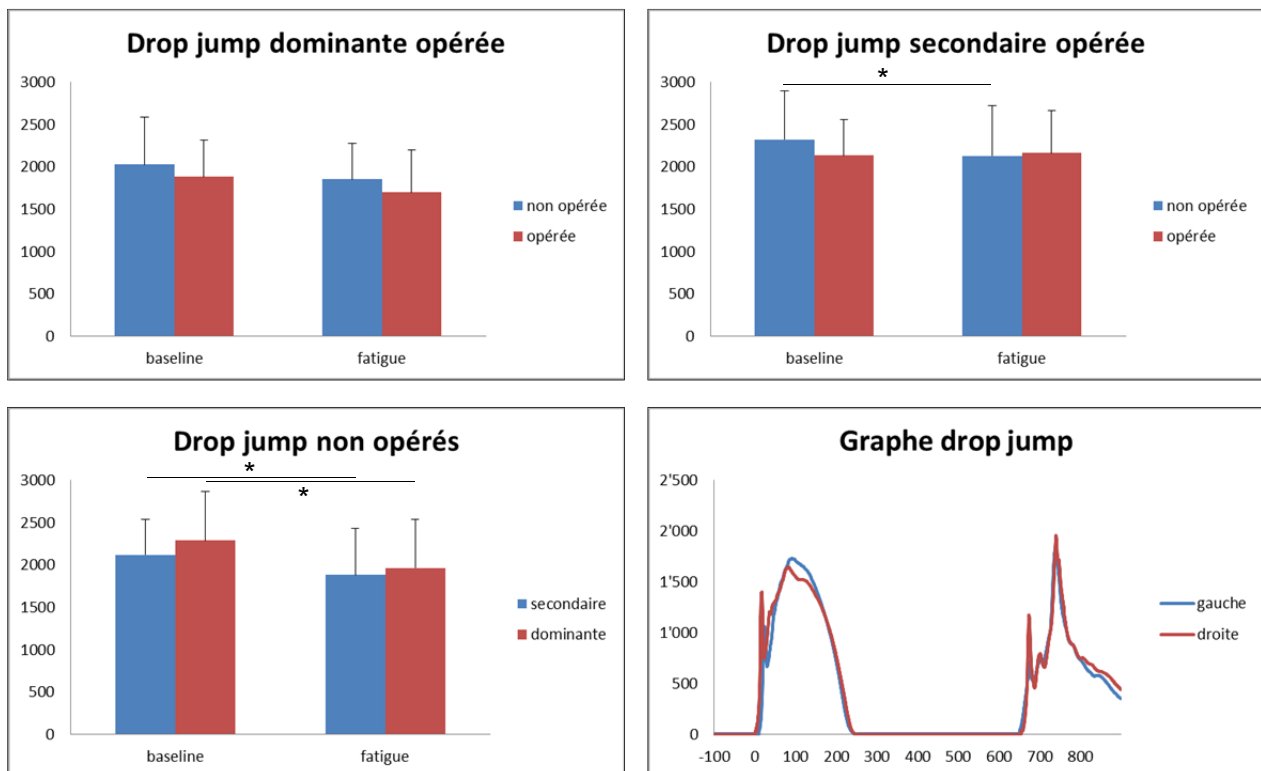
Tableau 3 : Graphiques des résultats des tests d'atterrissage



Pour le test de ligne de base du drop jump, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1881.98 N (écart-type 432.69), alors qu'elle est de 2027.69 N (écart-type 556.98) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 2131.77 N (écart-type 427.01) pour la jambe opérée, et de 2323.97 N (écart-type 572.71) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 2289.42 N (écart-type 573.26), alors qu'elle est de 2119.41 N (écart-type 416.75) pour la jambe secondaire.

Pour le test de drop jump après fatigue maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1698.10 N (écart-type 502.26), alors qu'elle est de 1851.01 N (écart-type 427.60) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 2163.17 N (écart-type 499.65) pour la jambe opérée, et de 2129.41 N (écart-type 592.72) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 1964.09 N (écart-type 572.53), alors qu'elle est de 1882.25 N (écart-type 550.09) pour la jambe secondaire. L'exemple du graphe de drop jump de ce sujet montre une légère différence de charges entre les deux jambes.

Tableau 4 : Graphiques des résultats des tests de drop jump

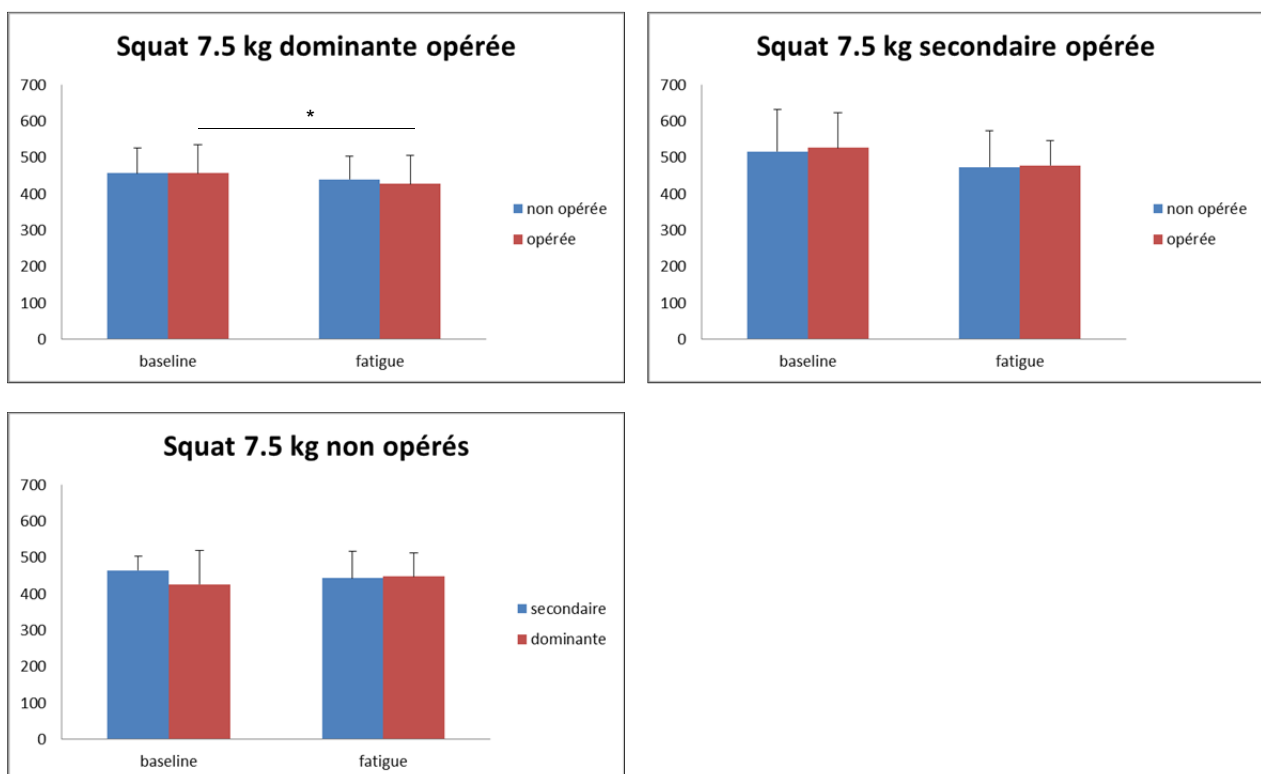


5.2 Tests de force

Pour le test de ligne de base de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 457.61 N (écart-type 78.77), alors qu'elle est de 456.73 N (écart-type 70.10) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 526.67 N (écart-type 97.68) pour la jambe opérée, et de 517.30 N (écart-type 114.43) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 426.75 N (écart-type 92.65), alors qu'elle est de 465.06 N (écart-type 38.00) pour la jambe secondaire.

Pour le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée après fatigue musculaire maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 427.88 N (écart-type 77.51), alors qu'elle est de 439.72 N (écart-type 64.26) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 478.26 N (écart-type 68.43) pour la jambe opérée, et de 474.22 N (écart-type 99.71) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 448.37 N (écart-type 64.39), alors qu'elle est de 443.97 N (écart-type 74.11) pour la jambe secondaire.

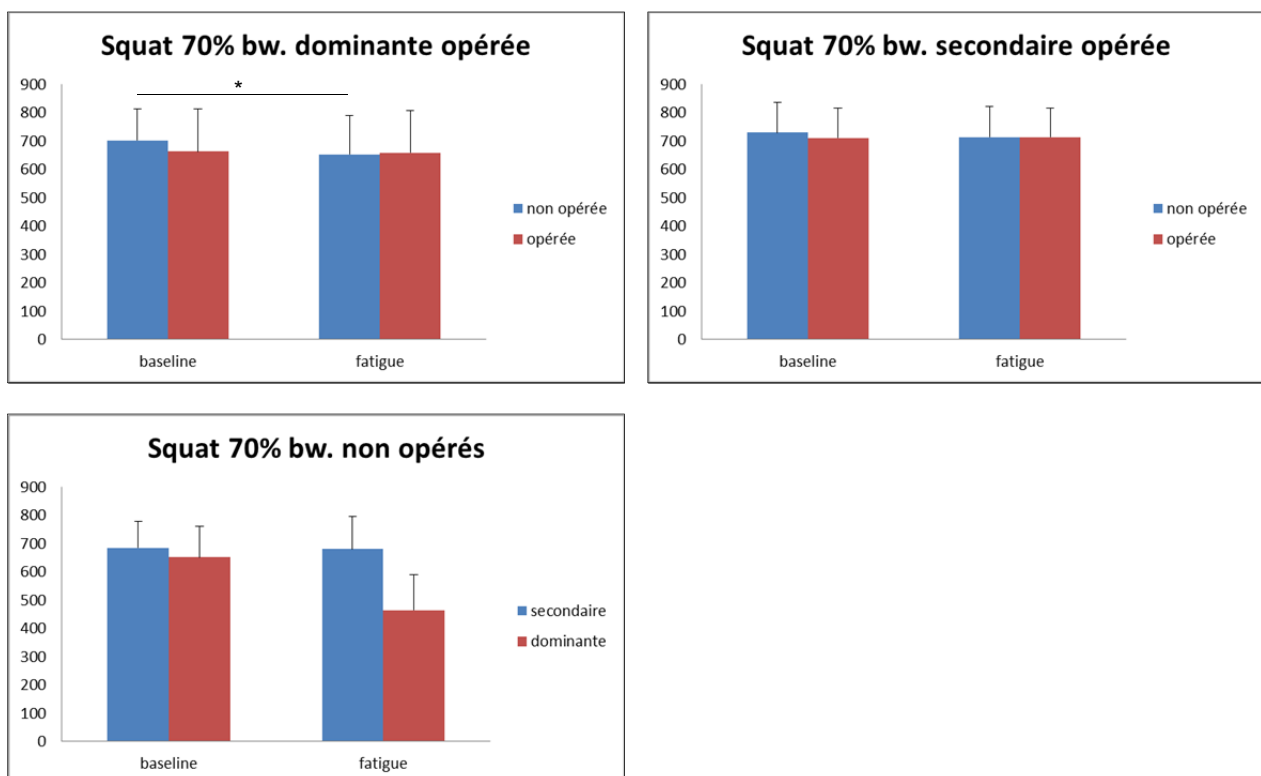
Tableau 5 : Graphiques des résultats des tests de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée



Pour le test de ligne de base de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 662.58 N (écart-type 149.41), alors qu'elle est de 702.37 N (écart-type 111.16) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 711.11 N (écart-type 105.37) pour la jambe opérée, et de 730.06 N (écart-type 96.51) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 651.71 N (écart-type 110.09), alors qu'elle est de 684.29 N (écart-type 93.08) pour la jambe secondaire.

Pour le test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée après fatigue musculaire maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 658.38 N (écart-type 149.71), alors qu'elle est de 652.86 N (écart-type 137.39) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 714.74 N (écart-type 102.16) pour la jambe opérée, et de 714.00 N (écart-type 107.04) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 662.50 N (écart-type 123.71), alors qu'elle est de 681.07 N (écart-type 115.03) pour la jambe secondaire.

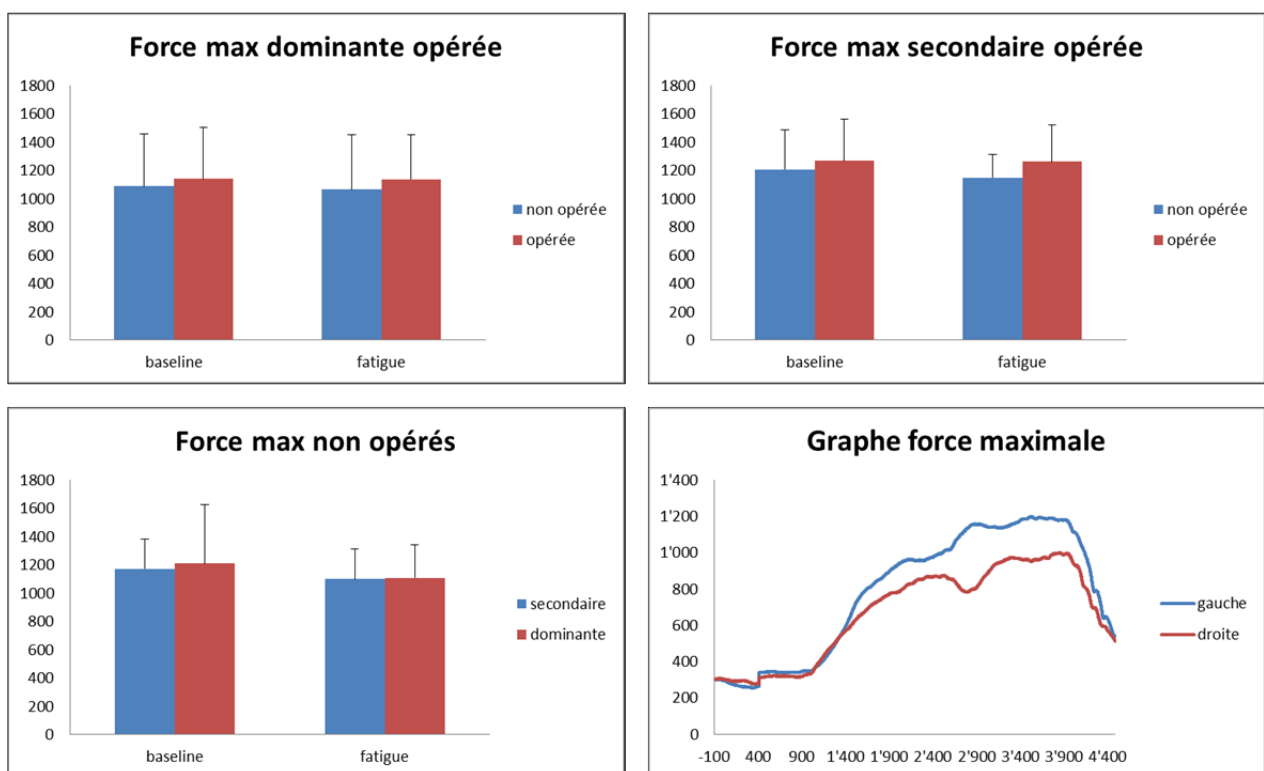
Tableau 6 : Graphiques des résultats des tests de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée



Pour le test de ligne de base de force maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1141.99 N (écart-type 364.49), alors qu'elle est de 1087.84 N (écart-type 369.65) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 1269.69 N (écart-type 296.19) pour la jambe opérée, et de 1207.21 N (écart-type 282.71) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 1210.47 N (écart-type 416.86), alors qu'elle est de 1171.67 N (écart-type 210.46) pour la jambe secondaire.

Pour le test de force maximale après fatigue musculaire maximale, la moyenne des charges pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 1136.51 N (écart-type 317.45), alors qu'elle est de 1066.50 N (écart-type 383.79) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets qui a opéré sa jambe secondaire, la moyenne est de 1263.71 N (écart-type 258.45) pour la jambe opérée, et de 1149.44 N (écart-type 165.54) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la moyenne de la jambe dominante est de 1110.00 N (écart-type 233.35), alors qu'elle est de 1101.58 N (écart-type 213.34) pour la jambe secondaire. L'exemple du graphe de force maximale de ce sujet montre une différence de charges entre les deux jambes.

Tableau 7 : Graphiques des résultats des tests de force maximale



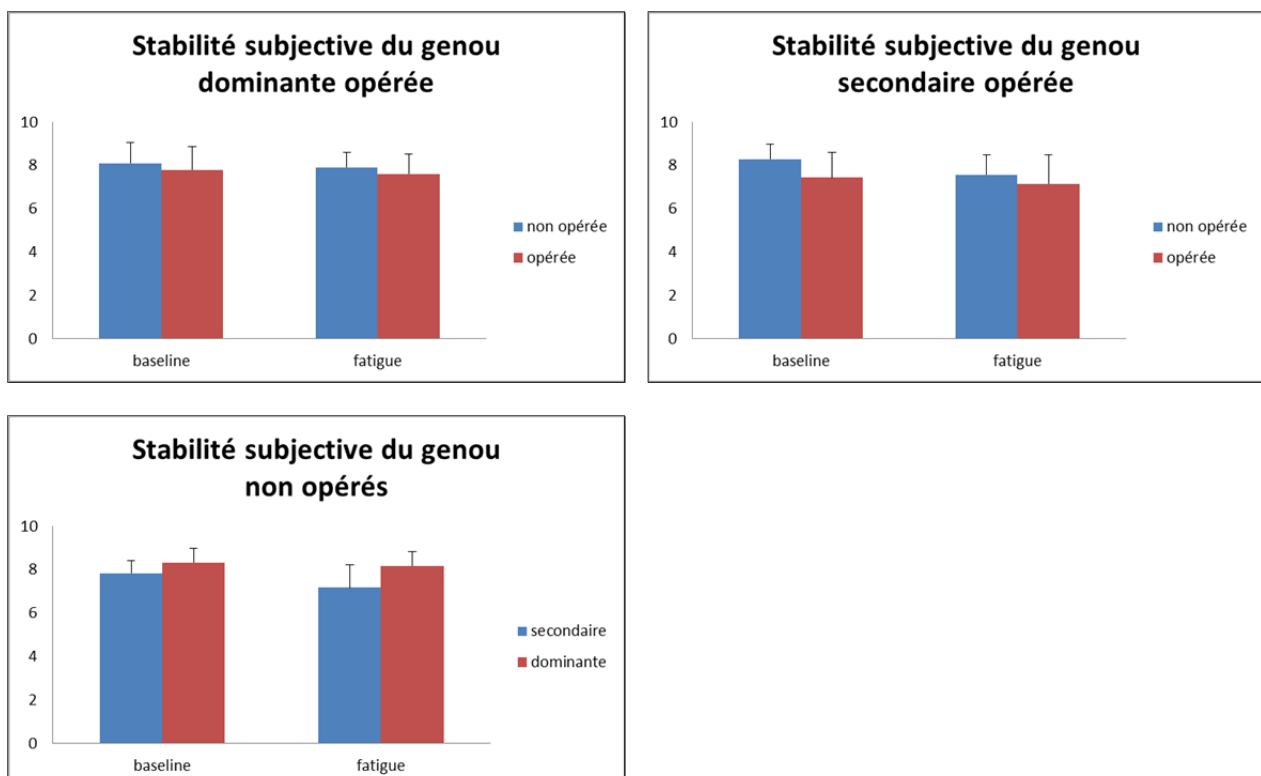
5.3 Analyse subjective de la stabilité du genou

Lors de l'analyse subjective de la stabilité du genou, nous avons quantifié l'observation subjective afin de pouvoir utiliser les données obtenues dans l'analyse statistique. Un genou stable est quantifié par la note 3, un genou moyennement stable par un 2 et un genou instable par la note 1.

Ainsi, pour le test de ligne de base de l'analyse de la stabilité du genou, la somme des résultats pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 7.80 (écart-type 1.08), alors qu'elle est de 8.10 (écart-type 0.94) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets ayant opéré la jambe secondaire, la somme des résultats est de 7.43 (écart-type 1.18) pour la jambe opérée, et de 8.29 (écart-type 0.70) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la somme des résultats de la jambe dominante est de 8.33 (écart-type 0.63), alors qu'elle est de 7.83 (écart-type 0.57) pour la jambe secondaire.

Pour l'analyse de la stabilité après fatigue musculaire maximale, la somme des résultats pour la jambe opérée dans le groupe qui a opéré sa jambe dominante est de 7.60 (écart-type 0.92), et de 7.90 (écart-type 0.70) pour la jambe saine. Pour le groupe de sujets ayant opéré la jambe secondaire, la somme des résultats est de 7.14 (écart-type 1.36) pour la jambe opérée, et de 7.57 (écart-type 0.90) pour la jambe saine. Pour le groupe contrôle, la somme des résultats de la jambe dominante est de 8.17 (écart-type 0.67), et de 7.17 (écart-type 1.05) pour la jambe secondaire.

Tableau 8 : Graphiques des résultats de l'analyse subjective de la stabilité du genou



5.4 Analyse statistique des résultats

Pour identifier les différences potentielles entre la mesure de ligne de base et la mesure après l'exercice de fatigue musculaire maximale dans les groupes, plusieurs analyses de variance ont été réalisées pour chaque paramètre (charge des deux jambes lors des tests d'atterrissage et de drop jump, et charge des deux jambes lors des tests de force maximale, de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée et de squats avec 7.5 kg de charge supplémentaire). Des changements de performance lors de ces tests ont été analysées à l'aide d'une procédure de mesures d'analyse de variance répétée ANOVA avec les facteurs intra-sujet de tests (test d'atterrissage, test de drop jump, test de force maximale, test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée et test de squats avec 7.5 kg de charge supplémentaire), de temps (ligne de base et fatigue), et de jambe (jambe opérée et jambe non opérée) et le facteur inter-sujet groupe (jambe dominante opérée et jambe secondaire opérée) [5 (tests) x 2 (temps) x 2 (jambes)].

Les différences entre les moyennes obtenues lors des différents tests ont été analysées avec une mesure ANOVA répétée avec les facteurs de tests, de temps, de jambe et de groupe. Si la valeur significative de P est inférieure à la borne 0.05, alors on peut en déduire que l'effet de l'interaction est statistiquement intéressant.

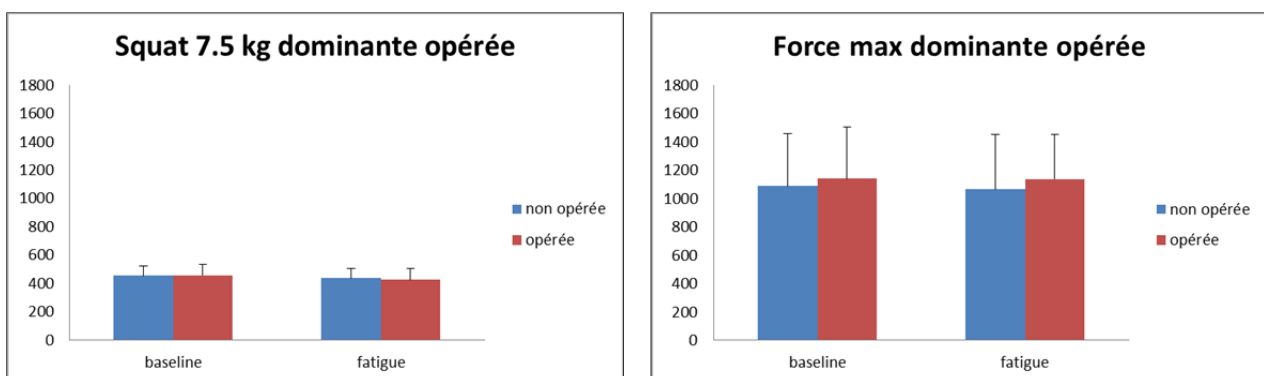
Le test de stabilité subjective du genou a quant à lui été perçu comme étant trop subjectif et n'apportant rien à la recherche. Il a donc été mis de côté lors de l'analyse de variance, mais les résultats figurent tout de même dans la recherche.

5.5 Résultats de l'ANOVA

L'analyse de variance a tout d'abord été effectuée sur les moyennes des tests de sauts et de force ensemble, puis chaque test a ensuite été analysé un à un.

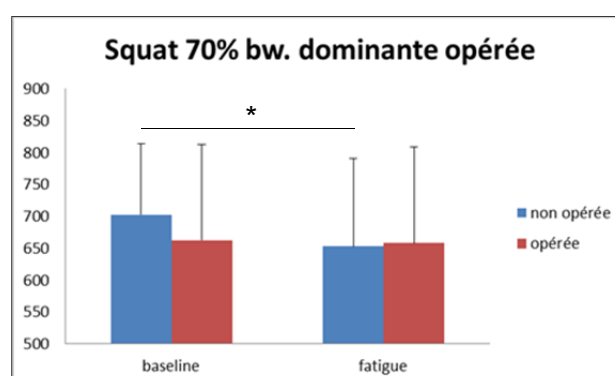
Les résultats de l'ANOVA concernant l'effet test montrent une signification $P = 0.000$ et une valeur $F_{4, 60} = 95.146$. Ce résultat est cohérent car les valeurs des moyennes des différents tests sont très différentes entre elles. Ainsi, si l'on prend l'exemple de la valeur pour le test de squats avec 7.5 kg de poids ajouté, on remarque qu'elle se situe aux alentours de 500 Newton, ce qui est très différent du test de force maximale qui s'approche de 1200 Newton.

Tableau 9 : Comparaison des échelles entre le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée et le test de force maximale



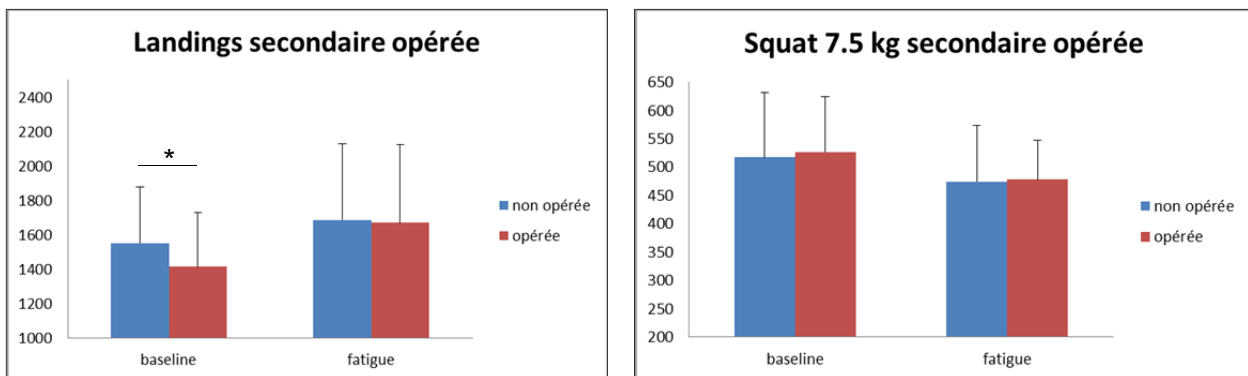
Concernant l'effet temps, nous avons regardé si des différences de moyennes étaient significatives entre les tests effectués en ligne de base et les tests effectués après la fatigue musculaire maximale. L'indice de signification est $P = 0.003$ et $F_{1, 15} = 12.240$. Cela prouve que la fatigue a réellement une influence sur les moyennes obtenues. On peut illustrer ceci par le graphique du test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée qui montre une différence entre le test de ligne de base et le test après fatigue.

Tableau 10 : Comparaison entre le test de ligne de base et le test après fatigue



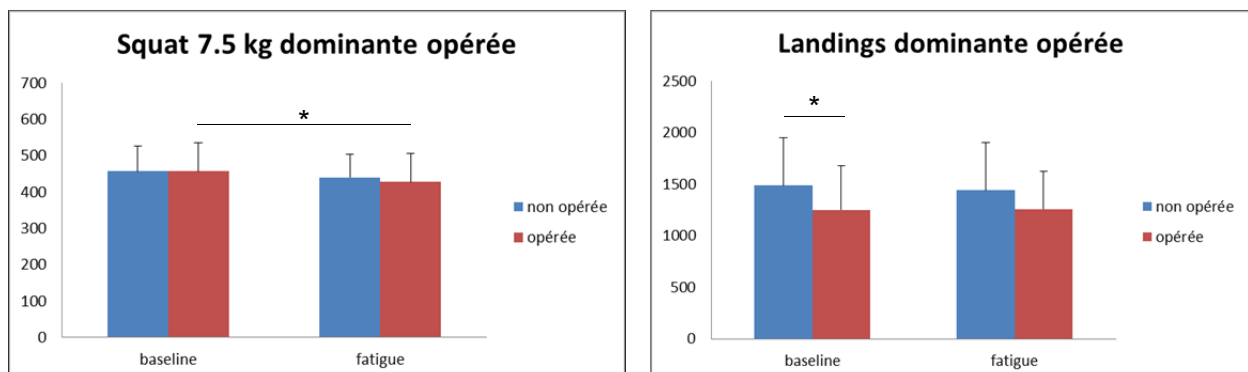
L'ANOVA permet également de montrer que la fatigue n'a pas la même influence pour tous les tests. En effet, un indice de signification de $P = 0.000$ et $F_{4, 60} = 15.788$ pour l'effet test*temps indique que la différence des moyennes après la fatigue musculaire maximale sur les différents tests est suffisamment grande pour être mise en évidence. On remarque ceci avec les graphiques suivants où l'on peut voir que pour le test d'atterrissage, la fatigue engendre une augmentation de la charge sur les jambes, alors que pour le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée, on remarque une diminution de la charge suite à la fatigue.

Tableau 11 : Comparaison de l'effet de la fatigue sur les différents tests



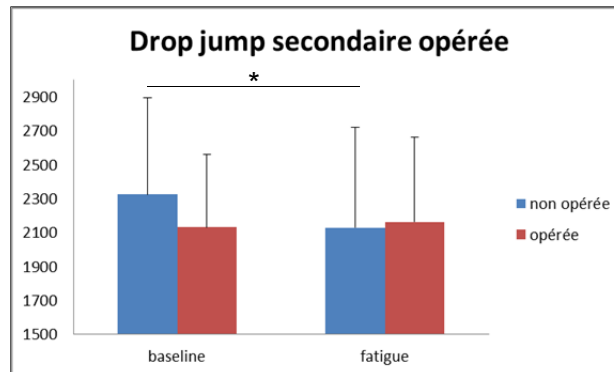
L'analyse de variance présente également un indice de signification de $P = 0.002$ et $F_{4, 60} = 4.686$ pour l'effet test*jambe. On peut donc affirmer qu'il existe une différence de charges entre les jambes dans les différents tests. On remarque que pour le test de squat avec 7.5 kg de charge ajoutée, il n'y a presque pas de différence entre les moyennes des deux jambes, alors que pour le test d'atterrissage, la différence entre les deux jambes est importante.

Tableau 12 : Comparaison de la différence de charges entre les deux jambes pour le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée et pour le test d'atterrissage



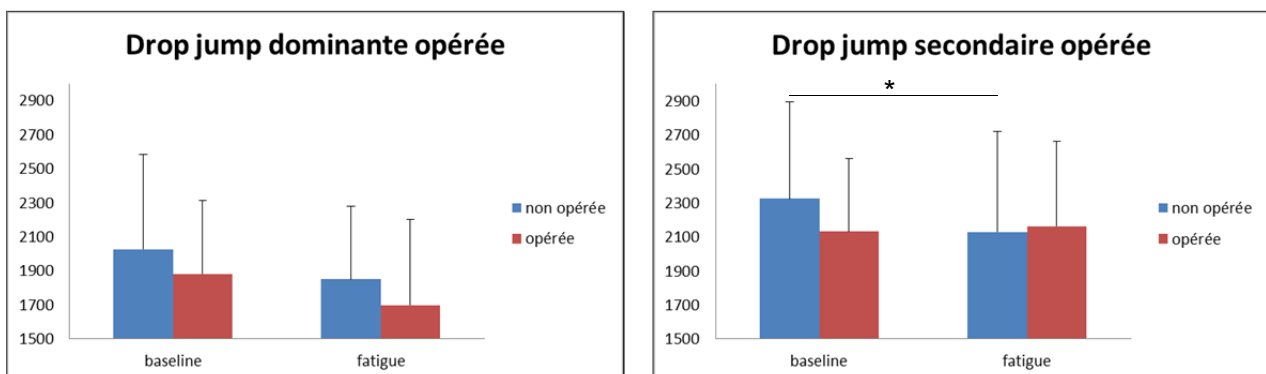
On peut également affirmer que la fatigue a une influence différente sur les deux jambes, en comparant les jambes opérée et non opérée. En effet, l'ANOVA donne les valeurs de signification $P = 0.001$ et $F_{1, 15} = 15.692$ pour l'effet temps*jambe. On peut l'illustrer par ce graphique du test de drop jump. On remarque que la fatigue influence la jambe non opérée en diminuant sa charge, alors qu'elle augmente légèrement la charge de la jambe opérée.

Tableau 13 : Illustration de la différence de l'effet de la fatigue sur les deux jambes



Finalement, l'analyse de variance offre la possibilité d'affirmer que la fatigue a une influence différente sur les deux jambes, et que cette influence est aussi différente si le groupe a opéré sa jambe dominante ou sa jambe secondaire. Les valeurs significatives $P = 0.019$ et $F_{1, 15} = 6.877$ permettent de mettre en évidence l'effet temps*jambe*groupe. Comme pour l'influence temps*jambe, on peut illustrer ceci par le drop jump. On voit alors que le groupe ayant opéré sa jambe dominante est influencé par la fatigue, avec une diminution similaire de la charge sur les deux jambes, alors que pour le groupe qui a opéré sa jambe secondaire, la fatigue a un effet qui augmente la charge sur la jambe opérée alors qu'elle la diminue sur la jambe non opérée.

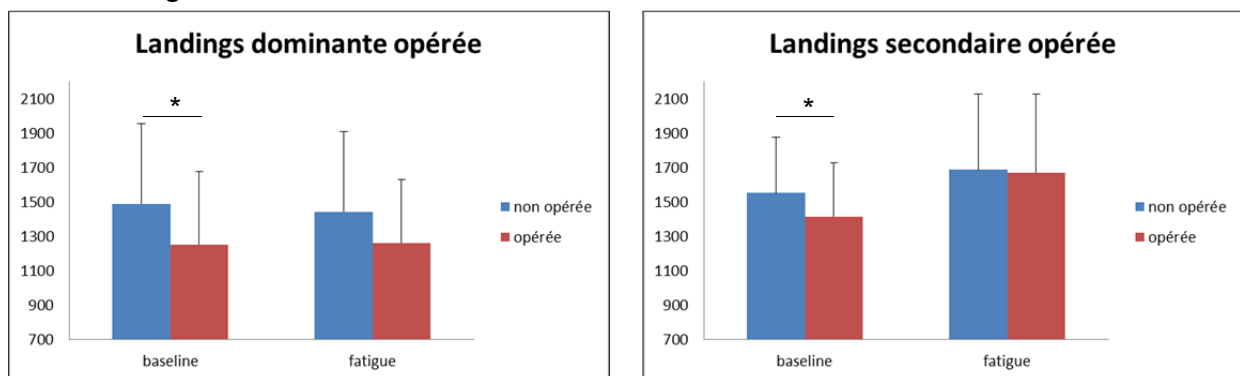
Tableau 14 : Comparaison de l'effet de la fatigue sur les deux jambes selon le groupe



Une analyse de variance a ensuite été effectuée sur chacun des tests, afin de vérifier les affirmations ci-dessus. Ainsi on a pu obtenir les résultats suivants :

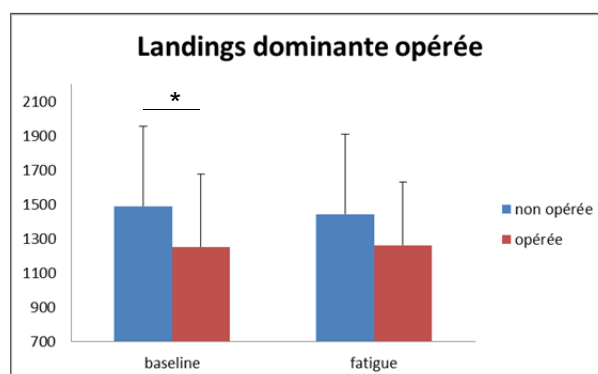
Pour le test d'atterrissage, on obtient une signification pour l'effet temps*groupe avec un indice de signification de $P = 0.041$ et $F_{1,15} = 4.996$. Cela signifie que la fatigue a une influence différente selon le groupe. On peut l'illustrer par le graphique suivant, où l'on peut voir que la fatigue engendre une diminution de la charge pour le groupe qui a opéré sa jambe dominante, alors qu'elle engendre une augmentation des charges pour le groupe qui a opéré sa jambe secondaire.

Tableau 15 : Comparaison de l'effet de la fatigue selon le groupe pour le test d'atterrissage



On obtient aussi un indice de signification pour l'effet jambe, de $P = 0.031$ et $F_{1,15} = 5.687$. Cela signifie que les résultats obtenus sont différents selon la jambe opérée et non opérée. On voit très bien cette différence de charges entre les deux jambes sur le graphe du groupe qui a opéré sa jambe dominante.

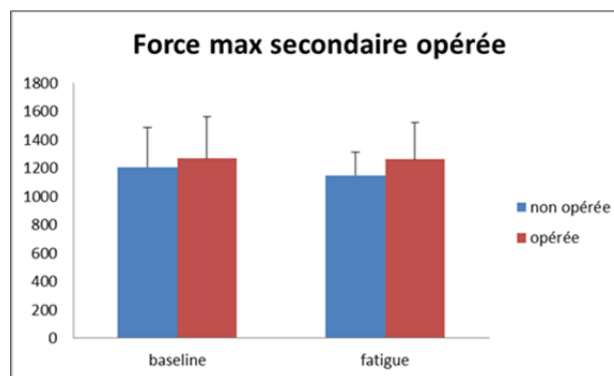
Tableau 16 : Comparaison de charge entre les deux jambes pour le test d'atterrissage



En ce qui concerne le test de drop jump, on ne trouve pas de signification entre les tests à l'aide de l'analyse de variance.

Pour le test de force maximale, l'analyse de variance indique une signification pour l'effet jambe de $P = 0.050$ et $F_{1,15} = 4.556$. Cela signifie que les résultats obtenus sont différents selon la jambe opérée et non opérée. On peut illustrer cette différence de charges entre les deux jambes avec le graphe du groupe qui a opéré sa jambe secondaire.

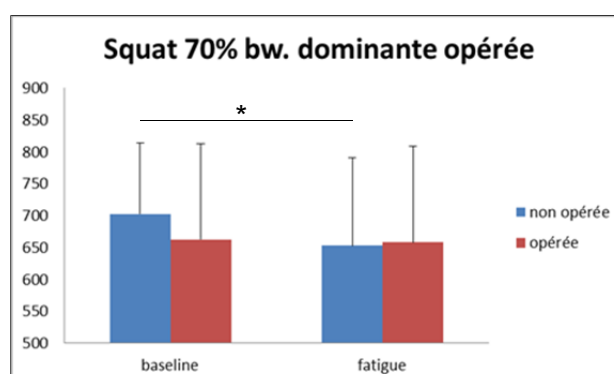
Tableau 17 : Comparaison de charge entre les deux jambes pour le test de force maximale



L'ANOVA ne révèle pas de résultats significatifs pour le test de squat avec 7.5 kg de charge supplémentaire.

Enfin, pour le test de squat avec 70% du poids du corps de charge ajoutée, on trouve une signification pour l'effet temps de $P = 0.000$ et $F_{1,15} = 84.853$. Celle-ci est mise en évidence sur le graphe ci-dessous, avec une différence de charges entre le test de ligne de base et le test après fatigue musculaire maximale.

Tableau 18 : Influence de la fatigue sur le test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée



6. Discussion

Dans cette recherche, nous avons évalué les performances des sujets aux tests de sauts, de force et de stabilité du genou. L'expérience se fait sous forme de pré-test – post-test, qui sont tous deux constitués des mêmes exercices, mais entrecoupés par un protocole de fatigue. Les tests consistent en une phase de tests de saut, une phase de tests de force et une phase d'analyse subjective de la stabilité du genou. Les tests de sauts comprennent un test d'atterrissage et un test de drop jump. Les tests de force sont composés d'un test de squat avec 7.5 kg de charge ajoutée et d'un test de squat avec 70% du poids du corps de charge ajoutée, comme tests de force explosive, et un test de force maximale. Tous ces tests sont réalisés avec chaque jambe sur une plateforme de forces afin d'enregistrer les variations de la charge des membres inférieurs durant l'activité. Une analyse subjective de la stabilité du genou est également effectuée durant la phase de tests. Le protocole de fatigue est mené entre les deux phases de tests afin de voir les différences entre le test sans fatigue, ou pré-test, et le test après l'exercice de fatigue, le post-test.

Les résultats des tests sur les plateformes de forces montrent des différences de charges entre les deux jambes chez les participants opérés comme chez les participants du groupe contrôle, et cela dès les premiers tests. Ce résultat était attendu car, comme le montrent Barber et al.⁵⁵, un indice de symétrie entre les membres supérieur à 85% est acceptable pour tout individu. Hodges et al.⁵⁶ indiquent qu'une asymétrie entre les membres inférieurs peut aussi être expliquée par le fait que chacun a une préférence dans la jambe d'appui. Par exemple, les footballeurs qui tirent plus précisément avec leur jambe droite prennent leur jambe gauche comme jambe d'appui afin de libérer la jambe la plus précise. Ainsi, dans leur recherche, une charge plus élevée a été remarquée sur la jambe gauche dès la phase de test sans fatigue.

Les résultats obtenus dans les tests de notre travail montrent des différences dans la charge des deux jambes. On remarque une charge réduite du côté opéré lors de l'atterrissage des sauts, une charge plus importante sur la jambe opérée lors du test de force maximale, et une charge semblable entre les deux jambes lors des séries de squats. On peut voir dans nos résultats que les charges des deux jambes varient non seulement selon les exercices, mais aussi en fonction de la jambe opérée ou non, et avec la fatigue.

⁵⁵ (Barber et al., 1990)

⁵⁶ (Hodges, Patrick, & Reiser, 2011)

Le protocole de fatigue a donc bel et bien un effet sur la répartition des charges entre les extrémités inférieures, mais ce n'est pas le seul à influencer les résultats. Après une analyse de variance répétée sur les différents tests, on peut confirmer l'hypothèse de base de cette recherche. En effet, on avait supposé qu'il existait une différence de performance dans des exercices de sauts et de force qui se manifestait par une asymétrie des charges entre les membres inférieurs chez une personne qui a subi une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur il y a au moins deux ans. On peut également affirmer que l'hypothèse de l'influence de la fatigue musculaire maximale du quadriceps sur la répartition des charges entre les extrémités inférieures est corroborée. Grâce à l'indice de signification de l'ANOVA de $P = 0.019$ et $F_{1, 15} = 6.877$ obtenu pour l'effet temps*jambe*groupe, on sait que la fatigue a une influence différente sur les deux jambes (opérée et non opérée), et que cette influence varie aussi selon le groupe (jambe dominante opérée ou jambe secondaire opérée). On peut donc affirmer que la fatigue a un effet différent sur les membres lors de diverses activités, en fonction du côté qui a subi l'opération. Déjà avant la recherche, nous savions, comme l'ont montré Orishimo et al.⁵⁷, que la fatigue avait une influence sur la biomécanique et engendrait des paramètres d'alignement d'atterrissages modifiés. Nous savons également maintenant que la fatigue a une influence sur la répartition des charges entre les extrémités inférieures.

Dans l'article de Gehring et al.⁵⁸, nous avons vu que lors d'exercices d'atterrissage, à 200 ms après le contact des pieds au sol, les angles maximaux de flexion du genou sont augmentés avec la fatigue et que les intégrales de pré-activation pour le muscle biceps fémoral, pour le semi-tendineux et pour le gastrocnémien sont réduites. Ainsi, une diminution de l'activation des muscles de la cuisse et du muscle gastrocnémien indiquent une réduction du contrôle musculaire actif de l'articulation du genou après l'exercice de fatigue. Cette influence peut sembler inattendue puisque l'exercice de fatigue a principalement été attribué aux muscles extenseurs de la jambe durant un exercice à la legpress. Ils supposent que cette stratégie d'inhibition antagoniste sert de mécanisme de compensation pour maintenir les schémas de mouvements généraux lorsque le quadriceps est affaibli. Augustsson et al.⁵⁹ proposent aussi une recherche sur l'influence de la fatigue sur la performance de saut. On voit que la fatigue induite dans notre expérience est identique à la fatigue proposée dans leur recherche. C'est donc également une fatigue d'ordre périphérique, qui se remarque par des changements dans le muscle

⁵⁷ (Orishimo et al., 2014)

⁵⁸ (Gehring et al., 2009)

⁵⁹ (Augustsson et al., 2006)

quadriceps lui-même, et non pas une fatigue du système nerveux central. La fatigue a engendré, comme dans le cas de Gehring et al., des diminutions de flexion du genou et de la hanche lors de la phase de préparation au saut. Ces modifications sont dues au fait que les sujets étaient capables de produire des forces horizontales moins grandes dans des conditions fatiguées. Cependant, aucun changement significatif de performance n'a été remarqué lors de la phase d'atterrissage sous l'effet de la fatigue. Lors de l'atterrissage de sauts de notre recherche, le participant a dû effectuer un mouvement de freinage du centre de gravité par une contraction musculaire excentrique. La différence de charges entre les deux jambes montre une réduction des charges du côté opéré qui peut s'expliquer par le fait qu'un atterrissage de saut peut être traumatisant pour l'articulation. Le sujet cherche donc inconsciemment à protéger sa jambe opérée en compensant avec l'autre jambe.

Les exercices de squats représentent souvent un élément essentiel dans la réhabilitation ou lors d'entraînement de condition physique. Il est donc important de prendre en compte une éventuelle asymétrie des charges avant de soumettre un sujet à de trop grandes séries d'exercices qui pourraient être nocifs si la symétrie n'est pas conservée⁶⁰. Dans l'article de Hodges et al.⁶¹, les résultats montrent une asymétrie de 4% dans la charge entre les deux jambes. Ces résultats suggèrent que les asymétries fonctionnelles, bien que faibles, sont aussi présentes chez les personnes en bonne santé au cours de l'exercice de squats. Dans leur recherche, l'asymétrie n'augmente pas avec la fatigue, mais diminue. Cette diminution suggère que les sujets chargent leurs membres de la même façon lorsque la fatigue augmente et ont des stimuli similaires pour les deux jambes. Dans notre cas, la répartition du poids du corps et l'influence de la fatigue sont aussi quasiment identiques pour les deux jambes. Il est difficile d'émettre une hypothèse concernant la raison pour laquelle on trouve ces résultats.

Comme le disent Angelozzi et al.⁶², la force maximale, ou contraction isométrique volontaire maximale, est un critère de récupération après une lésion du ligament croisé antérieur. Si le patient réussit à atteindre 85% à 90% de la force maximale de la jambe saine, alors la récupération est dite complète. Six mois après la reconstruction du ligament croisé antérieur, des valeurs de 80% pour un taux de développement de force de 30% de la contraction musculaire maximale, de 77% pour un taux de développement de force de 50% de la contraction musculaire maximale et de 63% pour un taux de développement de

⁶⁰ (Neitzel et al., 2002)

⁶¹ (Hodges et al., 2011)

⁶² (Angelozzi et al., 2012)

force de 90% de la contraction musculaire maximale ont été enregistrées. Les moyennes de taux de développement de la force du membre opéré ont atteint 90% seulement 12 mois après l'opération. Ces résultats suggèrent que, suite à une reconstruction du ligament croisé antérieur, le calcul du taux de développement de la force peut être une valeur intéressante à prendre en compte pour la mesure des résultats et pour la décision d'un retour à la compétition. Les résultats de notre recherche montrent une différence de performances entre la jambe opérée et la jambe saine pour le test de force maximale, avec une charge supérieure sur la jambe opérée. Le sujet produit une contraction isométrique maximale et sans mouvement. Cette immobilité peut donc expliquer le fait que le participant ne cherche pas à protéger son genou, mais crée au contraire toute la puissance dont il est capable. La charge supérieure sur la jambe opérée peut éventuellement être expliquée par le fait que, lors de la réhabilitation, le travail de physiothérapie se focalise sur la jambe opérée et peut engendrer une différence dans la musculature qui peut encore être présente au moment des tests.

L'analyse subjective de la stabilité du genou est jugée trop objective pour être validée dans ce travail. Nous pouvons tout de même citer les résultats d'une étude similaire. Melink et al.⁶³ ont trouvé que la fatigue musculaire provoque un délai de réflexe monosynaptique plus important, mais n'engendre pas de différence dans les latences des composantes de moyennes latences. La fatigue réduit également de façon significative les amplitudes de l'électromyogramme des composantes de courtes et moyennes latences. Elle provoque aussi une augmentation de la translation antérieure du tibia. De plus, la fatigue des ischio-jambiers est associée à une perte mécanique de la stabilité du genou qui peut en partie expliquer le risque accru de blessure du ligament croisé antérieur dans des conditions fatiguées. En ce qui concerne notre travail, les résultats de notre recherche montrent une stabilité inférieure pour la jambe opérée dans les deux groupes de sujets qui ont subi une reconstruction du ligament croisé antérieur. Cependant, peu de différences sont notées entre le pré-test et le post-test, et la fatigue n'a donc pas d'influence particulière sur la stabilité subjective du genou des sujets opérés.

⁶³ (Melnyk & Gollhofer, 2007)

7. Conclusion

Souvent, les blessures sportives interviennent en fin de compétition, lorsque la fatigue se fait sentir. Il est donc important de pouvoir recourir à des tests standardisés valables sur ce point. La plupart des tests fonctionnels réalisés durant la réhabilitation ou pour la préparation physique du sportif sont effectués dans un état normal, sans comparaison de résultats avec des performances après l'intervention de la fatigue. Il serait donc intéressant d'établir une série de tests fonctionnels standardisés qui comprennent une comparaison des performances avant et après la fatigue.

Nous savons à présent, grâce aux tests réalisés dans cette recherche, que le rapport entre les charges des extrémités inférieures est asymétrique lors de différentes activités et qu'il varie avec l'apparition de la fatigue musculaire, chez les sujets opérés comme chez les sujets sains. Il faudrait donc être attentif au fait que la fatigue musculaire influence la répartition des charges lors de la prescription de différents exercices, et que le patient ne se rend pas forcément compte qu'il charge ses jambes différemment.

Une vision d'avenir consisterait à déterminer si l'influence de la fatigue sur la répartition des charges au niveau des extrémités inférieures peut être positive ou est strictement négative pour les articulations, et si elle peut mener à un risque accru de nouvelle blessure ou de récurrence de blessure au niveau du ligament croisé antérieur. Il serait également intéressant d'effectuer un test de stabilité du genou standardisé pour voir si des différences plus marquées interviennent avec l'apparition de la fatigue musculaire.

8. Bibliographie

8.1 Articles

- Angelozzi, M., Madama, M., Corsica, C., Calvisi, V., Properzi, G., McCaw, S. T., & Cacchio, A. (2012). Rate of force development as an adjunctive outcome measure for return-to-sport decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther*, 42(9), 772-780.
- Augustsson, J., Thomee, R., Linden, C., Folkesson, M., Tranberg, R., & Karlsson, J. (2006). Single-leg hop testing following fatiguing exercise: reliability and biomechanical analysis. *Scand J Med Sci Sports*, 16(2), 111-120.
- 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.
- Barenius, B., Ponzer, S., Shalabi, A., Bujak, R., Norlen, L., & Eriksson, K. (2014). Increased risk of osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction: a 14-year follow-up study of a randomized controlled trial. *Am J Sports Med*, 42(5), 1049-1057.
- Behrens, M., Mau-Moeller, A., Wassermann, F., & Bruhn, S. (2013). Effect of fatigue on hamstring reflex responses and posterior-anterior tibial translation in men and women. *PLoS ONE*, 8(2).
- Chalmers, P. N., Mall, N. A., Moric, M., Sherman, S. L., Paletta, G. P., Cole, B. J., & Bach, B. R., Jr. (2014). Does ACL reconstruction alter natural history?: A systematic literature review of long-term outcomes. *J Bone Joint Surg Am*, 96(4), 292-300.
- 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.
- Coren, S. (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.
- 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.

- Gehring, D., Melnyk, M., & Gollhofer, A. (2009). Gender and fatigue have influence on knee joint control strategies during landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 24(1), 82-87.
- Gustavsson, A., Neeter, C., Thomee, P., Silbernagel, K. G., Augustsson, J., Thomee, R., & Karlsson, J. (2006). A test battery for evaluating hop performance in patients with an ACL injury and patients who have undergone ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 14(8), 778-788.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr., Colosimo, A. J., McLean, S. G., van den Bogert, A.J., Paterno, M.V., & Succop, P. (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.
- Hodges, S. J., Patrick, R. J., & Reiser, R. F., 2nd. (2011). Effects of fatigue on bilateral ground reaction force asymmetries during the squat exercise. *J Strength Cond Res*, 25(11), 3107-3117.
- Kalberer, L., Meyer, S., & Gojanovic, B. (2013). Einsatz eines neuen, multifaktoriellen «Return to Competition Score» für Athleten nach einer vorderen Kreuzbandruptur. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 61(2), 31–34.
- 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.
- Liederbach, M., Kremenich, I. J., Orishimo, K. F., Pappas, E., & Hagins, M. (2014). Comparison of landing biomechanics between male and female dancers and athletes, part 2: influence of fatigue and implications for anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*, 42(5), 1089-1095.
- Mather, R. C., 3rd, Hettrich, C. M., Dunn, W. R., Cole, B. J., Bach, B. R., Jr., Huston, L. J., Reinke, E. K., & Spindler, K. P. (2014). Cost-effectiveness Analysis of Early Reconstruction Versus Rehabilitation and Delayed Reconstruction for Anterior Cruciate Ligament Tears. *Am J Sports Med*.
- McLean, S. G., Fellin, R. E., Suedekum, N., Calabrese, G., Passerallo, A., & Joy, S. (2007). Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc*, 39(3), 502-514.
- Melnyk, M., & Gollhofer, A. (2007). Submaximal fatigue of the hamstrings impairs specific reflex components and knee stability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 15(5), 525-532.
- 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.

- Oiestad, B. E., Holm, I., Aune, A. K., Gunderson, R., Myklebust, G., Engebretsen, L., Fosdahl, M. A., & Risberg, M. A. (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.
- Orishimo, K. F., & Kremenec, I. J. (2006). Effect of fatigue on single-leg hop landing biomechanics. *J Appl Biomech*, 22(4), 245-254.
- Orishimo, K. F., Liederbach, M., Kremenec, I. J., Hagins, M., & Pappas, E. (2014). Comparison of landing biomechanics between male and female dancers and athletes, part 1: influence of sex on risk of anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*, 42(5), 1082-1088.
- 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.
- Schindler, O. S. (2012). The story of anterior cruciate ligament reconstruction--Part 1. *J Perioper Pract*, 22(5), 163-171.
- 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*.
- Wojtys, E. M., Wylie, B. B., & Huston, L. J. (1996). The effects of muscle fatigue on neuromuscular function and anterior tibial translation in healthy knees. *Am J Sports Med*, 24(5), 615-621.
- Xie, X., Xiao, Z., Li, Q., Zhu, B., Chen, J., Chen, H., Yang, F., Chen, Y., Lai, Q., Liu, X. (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.

8.2 Livre

Faller, A., Sprumont, P., & Schünke, M. (2006). L'articulation du genou. In D. Boeck (Ed.), *Le corps humain* (5ème éd.). Bruxelles. 154-157.

8.3 Sites internet

<http://www.genou.com/Anatomiegenou.htm>, consulté le 20 mai 2014.

<http://www.centredugenou.com/2-capsule-lanatomie-et-la-fonction-du-genou.html>, consulté le 20 mai 2014.

<http://doc.doc.pagesperso-orange.fr/genou.htm>, consulté le 20 mai 2014.

<http://www.genou.com/lcaanatomie.htm>, consulté le 20 mai 2014.

<http://www.orthopale.org/ligament-croise-anterieur.php>, consulté le 21 mai 2014.

[http://chirurgiedusport.com/Traitements-GENOU-Ligament-Operation__du_ligament_croise_anterieur_\(LCA\)__DIDT_ou_KJ-f-4-c-2336-sc-16-a-760045.html](http://chirurgiedusport.com/Traitements-GENOU-Ligament-Operation__du_ligament_croise_anterieur_(LCA)__DIDT_ou_KJ-f-4-c-2336-sc-16-a-760045.html), consulté le 27 mai 2014.

<http://www.preparation-physique.net/physiologie-staps/233.html>, consulté le 23 mai 2014.

8.4 Document pdf

Masterarbeitsthemen13.pdf

9. Tables des illustrations

9.1 Liste des Figures


Figure 1 : Vue frontale de l'articulation du genou, source internet : http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00549	11
Figure 2 : Rupture du ligament croisé antérieur, source internet : http://chirurgiedusport.com	13
Figure 3 : Représentation schématique d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur par autogreffe du tendon rotulien, source internet : http://chirurgiedusport.com	15
Figure 4 : Graphe des coefficients de l'échelle de retour à la compétition, (Kalberer, Meyer, & Gojanovic, 2013)	18
Figure 5 : Atterrissage.....	29
Figure 6 : Drop jump, vue de profil.....	30
Figure 7 : Drop jump, vue de face.....	30
Figure 8 : Squats avec 7.5 kg de charge ajoutée.....	31
Figure 9 : Force maximale	32
Figure 10 : Saut avec atterrissage sur une seule jambe	33
Figure 11 : Fatigue musculaire maximale à la legpress	34

9.2 Liste des Tableaux

Tableau 1 : Résultats du test de charge à différents angles de flexion du genou, (Chmielewski et al., 2002).....	20
Tableau 2 : Résultats du test de saut à une jambe, (Augustsson et al., 2006).....	26
Tableau 3 : Graphiques des résultats des tests d'atterrissage	37
Tableau 4 : Graphiques des résultats des tests de drop jump	38
Tableau 5 : Graphiques des résultats des tests de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée	39
Tableau 6 : Graphiques des résultats des tests de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée	40
Tableau 7 : Graphiques des résultats des tests de force maximale	41
Tableau 8 : Graphiques des résultats de l'analyse subjective de la stabilité du genou	42
Tableau 9 : Comparaison des échelles entre le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée et le test de force maximale	44
Tableau 10 : Comparaison entre le test de ligne de base et le test après fatigue	44
Tableau 11 : Comparaison de l'effet de la fatigue sur les différents tests	45
Tableau 12 : Comparaison de la différence de charges entre les deux jambes pour le test de squats avec 7.5 kg de charge ajoutée et pour le test d'atterrissage	45
Tableau 13 : Illustration de la différence de l'effet de la fatigue sur les deux jambes	46
Tableau 14 : Comparaison de l'effet de la fatigue sur les deux jambes selon le groupe	46
Tableau 15 : Comparaison de l'effet de la fatigue selon le groupe pour le test d'atterrissage	47
Tableau 16 : Comparaison de charge entre les deux jambes pour le test d'atterrissage ...	47
Tableau 17 : Comparaison de charge entre les deux jambes pour le test de force maximale	48
Tableau 18 : Influence de la fatigue sur le test de squats avec 70% du poids du corps de charge ajoutée	48

10. Annexes

10.1 ANNEXE I : Note d'information destinée aux participants de l'étude



UNIVERSITY OF FRIBOURG / MOVEMENT AND SPORT SCIENCE

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 somatosensorielle – 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 somatosensoriel 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 et 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 plates-formes 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 plate-forme 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.

10.2 ANNEXE II : Consentement



UNIVERSITY OF FRIBOURG / MOVEMENT AND SPORT SCIENCE

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: _____

10.3 ANNEXE III : Questionnaire pour les participants



UNIVERSITY OF FRIBOURG / MOVEMENT AND SPORT SCIENCE

**« 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

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

11. Remerciements

Arrivée au terme de cette recherche, je tiens à remercier toutes les personnes ayant, de près ou de loin, participé et amené leur aide précieuse à l'élaboration de ce travail.

Tout d'abord, j'exprime mes remerciements à M. Martin Keller, co-conseiller, pour l'élaboration de ce travail, pour l'encadrement lors des différentes phases de la recherche et pour la disponibilité tout au long de la rédaction du travail.

Je remercie également le Prof. Dr. Wolfgang Taube, conseiller, pour l'élaboration de ce travail et pour l'encadrement général durant la recherche.

Par la même occasion, je remercie l'unité des Sciences du Mouvement et du Sport de l'Université de Fribourg pour la mise à disposition des infrastructures et du matériel durant cette recherche.

Un merci tout particulier à ma collègue Marie Bussard, pour la collaboration durant la première phase de ce travail, particulièrement lors de la recherche de participants et la récolte des données durant les tests.

Je tiens également à remercier chaleureusement tous les participants de cette étude, sans qui elle n'aurait pas été possible. Ils se sont tous engagés sérieusement, en donnant de leur temps et de leur énergie, afin de permettre à ce projet de voir le jour.

Finalement, je remercie sincèrement ma sœur, Marion Muller, pour la relecture du document, et ma famille et mes amis, pour leur soutien durant l'élaboration de ce travail.

12. Déclarations

12.1 Déclaration personnelle

Je, sous-signée, certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou de manière analogue à partir de publications ou de sources externes, a été rendu reconnaissable comme tel.

Lieu, date : _____

Signature : _____

12.2 Déclaration de l'auteur

Je, sous-signée, reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport de l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur – y compris les droits de publication et autres droits liées à des fins commerciales – à l'Université de Fribourg. Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière.

Lieu, date : _____

Signature : _____