

UFR Staps

Sciences & techniques
des activités physiques
et sportives

MASTER 2 Entraînement et Optimisation
de la performance Sportive (EOPS)

ANNEE UNIVERSITAIRE 2019-2020

**Mise en place d'un entraînement du
contrôle neuromusculaire chez des
patients opérés du ligament croisé
antérieur**

Présenté par : LE BALCH Marion

Lieu de stage : Centre l'Ekipé (Paris, Vème arr.)

Maitre de stage : EL HARIRI Badr (MKDE)

Directeur de mémoire : LE SANT Guillaume (PhD)

Jury :

- HUG François (Professeur des Universités)
- LACOURPAILLE Lilian (Maître de conférences)
- NORDEZ Antoine (Professeur des Universités)

www.univ-nantes.fr/staps



UNIVERSITÉ DE NANTES



Charte anti-plagiat de l'Université de Nantes

Approuvée par le Conseil d'administration de l'Université de Nantes en date du 21 octobre 2011

Préambule

L'Université de Nantes est engagée contre le plagiat, afin de garantir la qualité de ses diplômes et l'originalité des publications pédagogiques et scientifiques de ses personnels enseignants et/ou chercheurs. Les travaux quels qu'ils soient (devoirs, compte-rendu, mémoire, cours, articles, thèses), réalisés aussi bien par les étudiants que par les personnels universitaires, doivent toujours avoir pour ambition de produire un savoir inédit et d'offrir une lecture nouvelle et personnelle d'un sujet. La présente charte définit les règles à respecter en la matière, par l'ensemble des étudiants et universitaires.

Article 1

Les étudiants et les personnels sont informés que le plagiat constitue la violation la plus grave de l'éthique universitaire. Le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable.

Article 2

Les étudiants et les personnels s'engagent à ne pas commettre de plagiat dans leurs travaux, quels qu'ils soient : devoirs et compte-rendu remis par les étudiants à un enseignant, mémoire, cours, articles de recherche, thèse. Le fait de commettre un plagiat en vue d'obtenir indûment une note, un diplôme ou un grade universitaire est une circonstance aggravante. Le fait de commettre un plagiat dans un document destiné à être publié, mémoire de master ou de thèse, article à paraître dans une revue, est aussi une circonstance aggravante. La reproduction d'une œuvre originale sans le consentement de l'auteur est de plus qualifiée juridiquement de contrefaçon (articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle).

Article 3

Les étudiants et les personnels s'engagent à citer, en respectant les règles de l'art, les travaux qu'ils utilisent ou reproduisent partiellement. Les reproductions de courts extraits en vue d'illustration, ou à des fins pédagogiques sont en effet autorisées sans nécessité de demander le consentement de l'auteur. Néanmoins, la méthodologie d'un travail universitaire, quel qu'il soit, implique que les emprunts soient clairement identifiés (guillemets) et que le nom de l'auteur et la source de l'extrait soient mentionnés. Les travaux universitaires ne consistent pas en la reproduction d'une ou de plusieurs sources, mais doivent toujours avoir pour ambition de produire un savoir inédit et d'offrir une lecture nouvelle et personnelle du sujet.

Article 4

L'Université de Nantes se réserve le droit de rechercher systématiquement les tentatives de plagiat par l'utilisation d'un logiciel de détection de plagiat. Les étudiants et les personnels s'engagent à communiquer, sur simple demande de l'Université, une version numérique de leur document avant publication, afin de permettre cette détection.

Article 5

Les manquements à la présente charte sont passibles de sanctions disciplinaires : avertissement, blâme, annulation du diplôme préparé, exclusion de l'Université pour une durée limitée, exclusion définitive de l'Université, exclusion de tout établissement public d'enseignement supérieur pour une durée limitée, exclusion définitive de tout établissement d'enseignement supérieur. Les auteurs présumés de plagiat seront systématiquement traduits devant la section disciplinaire compétente. La procédure disciplinaire ne préjuge pas d'éventuelles poursuites judiciaires dans les cas où le plagiat est aussi caractérisé comme étant une contrefaçon.

Toute information complémentaire sur les textes législatifs et réglementaires en vigueur et les règles de l'art pour la citation, peut être consultée dans le dossier plagiat sur le site de l'Université de Nantes : <http://www.univ-nantes.fr/charte-antiplagiat>.

Je soussignée Marion Le Balch, étudiante en Master 2 EOPS à l'Université de Nantes, certifie que ce mémoire est strictement le résultat de mon travail personnel.

Il respecte en tous points la charte anti-plagiat de l'Université de Nantes que j'ai rendue signée au moment du dépôt de ma convention de stage. Tout manquement à cette charte entraînerait immédiatement la note de 0.

De plus, je certifie que les résultats présentés sont issues d'expérimentations que j'ai personnellement réalisées. Je tiens à la disposition du jury l'ensemble des résultats bruts et traités pour vérification. En cas de demande de la part du jury, la non-présentation de ces données entraînerait immédiatement la note de 0.

« Lu et approuvé », à Nantes, le 3 juin 2020

LE BALCH Marion

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier, Guillaume Le Sant, mon référent universitaire, pour son investissement et sa patience tout au long de ce projet. Ses conseils m'ont été précieux dans les moments compliqués.

Je remercie les différents formateurs et enseignants de l'IFM3R et de l'UFR STAPS ainsi que tous les professionnels que j'ai eu la chance de rencontrer lors de mes différents stages. Plus précisément, je tiens à remercier Badr El Hariri et l'ensemble des kinésithérapeutes du centre « L'Ekipe » à Paris pour leur implication et leur accompagnement sur le terrain durant ce travail.

Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien sans faille durant ces cinq années d'études et de me permettre de réaliser mon rêve de devenir masseur-kinésithérapeute.

Une mention spéciale revient à Thomas pour son soutien au quotidien, à mes amis et principalement mes trois acolytes rencontrées en première année de kinésithérapie. Sans eux, ce parcours n'aurait pas été le même.

Enfin, et pourtant pas des moindres, je remercie tous les participants à mon étude de m'avoir fait confiance et de m'avoir consacré de leur temps.

Sommaire

1	<i>Introduction</i>	1
2	<i>Revue de littérature</i>	2
2.1	Physiopathologie.....	2
2.2	Évaluation d'une personne opérée d'une plastie du LCA et critères de retour au sport.....	6
2.3	Méthodes d'évaluation qualitative du contrôle neuromusculaire	8
2.4	Améliorer le contrôle neuromusculaire d'un patient opéré du LCA afin de lui permettre de reprendre le sport de manière sécurisée	10
3	<i>Objectifs et hypothèses</i>	11
4	<i>Matériel et méthode</i>	11
4.1	Caractéristiques de la population.....	11
4.2	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	12
4.3	Méthodes.....	12
4.4	Programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire proposé	14
4.5	Analyses statistiques.....	17
5	<i>Résultats</i>	18
5.1	Effets de l'intervention sur la force musculaire	18
5.2	Effets de l'intervention sur les tests fonctionnels	20
5.3	Réussite de la batterie de tests	21
6	<i>Discussion</i>	22
6.1	Synthèse des résultats	22
6.2	Variabilités interindividuelles	25
6.3	Limites des tests	25
6.4	Limites de l'étude.....	29
7	<i>Conclusion</i>	30

1 Introduction

La rupture du ligament croisé antérieur (LCA) est l'une des blessures les plus importantes chez les sportifs. Elle a fait l'objet d'une attention croissante au cours des dernières décennies en raison de traitements chirurgicaux compliqués, d'une longue réhabilitation et de conséquences néfastes musculo-squelettiques à long terme. Annuellement, aux États-Unis, le nombre de blessures du ligament croisé antérieur est estimé entre 60 000 et 175 000 cas, majoritairement dans une catégorie d'âge comprise entre 15 et 25 ans. Son incidence accroît, en grande partie en raison de l'augmentation du nombre de personnes pratiquant des activités physiques et sportives, puisque 80% de ces blessures surviennent au cours de la pratique sportive et plus particulièrement dans le cadre de sports de pivot-contact (Lyman et al., 2009 ; Alentorn-Geli et al., 2009b).

La majorité des patients victimes de cette lésion ont pour objectif de retourner à leur sport de prédilection rapidement, à un niveau identique à celui précédant la blessure. Néanmoins, beaucoup ne récupèrent pas leur niveau antérieur (Arderne et al., 2016). Seulement 75% retrouvent une activité physique, 55% des athlètes retournent à un niveau de sport compétitif après cette opération et parmi eux, seuls 65% retrouvent leur niveau pré-blessure (Arderne et al., 2014). Il ressort aussi que les femmes se retrouvent davantage en échec lorsque l'on s'intéresse à un retour au sport au niveau antérieur. En effet, seules 26% d'entre elles y parviennent contre 37% des hommes, même si les femmes et les hommes semblent avoir les mêmes intentions de retourner au sport.

De plus, il est important de considérer le taux de récurrence de rupture du LCA, compris entre 3 et 19% selon les auteurs, ainsi que le taux de lésions controlatérales se situant entre 5 et 24% (Barber-Westin & Noyes, 2011). Un athlète ayant été opéré d'une reconstruction du LCA court quinze fois plus de risques de rupture ipsilatérale ou controlatérale par rapport à un groupe contrôle sain. La cause principale pouvant être que les athlètes ne rétablissent pas les différentes fonctions musculaires présentes avant leur blessure (Thomeé et al., 2011).

Dans la plupart des études, le retour au sport est déterminé par le délai post-chirurgical (Burgi et al., 2019). Plusieurs critères sont néanmoins développés dans la littérature pour permettre de quantifier cette fonction musculaire et envisager un retour au sport. Cela repose sur la création d'une batterie de tests, permettant de valider la reprise sportive des patients selon des critères objectifs afin de limiter le risque de récurrence de lésion.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte puisque la prise en charge de patients opérés du LCA occupe une place importante au sein de la structure de rééducation « l'Équipe » à Paris (Vème arrondissement), lieu où nous avons réalisé notre stage.

2 Revue de littérature

2.1 Physiopathologie

2.1.1 Mécanismes de rupture

Le LCA est l'un des quatre principaux ligaments du genou. Il trouve son origine sur la face médiale du condyle fémoral latéral, et se dirige de manière oblique vers le bas, l'avant et le dedans pour se terminer entre les cornes méniscales au niveau de l'espace intercondyloire tibial. Il forme avec le ligament croisé postérieur le « pivot central » de cette articulation, essentiel à sa stabilité. La fonction première du LCA est de limiter le déplacement antérieur du tibia par rapport au fémur, et sa fonction secondaire est de retenir les rotations et les angulations dans le plan frontal (Beynnon et al., 2005). Du fait de l'étendue des insertions, cela permet de couvrir la fonction sur l'ensemble du secteur articulaire en évitant des sollicitations importantes (Kapandji, 2009).

La rupture du LCA apparaît majoritairement lors des sports de pivot-contact. Bien que ces blessures puissent avoir lieu lors d'un contact avec l'adversaire, il est intéressant de prendre en considération les mécanismes de rupture lorsque cette blessure survient sans intervention extrinsèque. Les scénarios de jeu entraînant cette rupture reposent couramment sur un changement de direction associé à une décélération, un atterrissage à partir d'un saut et un mouvement de pivot du genou lorsque le pied est fixé au sol (Alentorn-Geli et al., 2009a). Dans la littérature, d'autres mécanismes à risque sont aussi identifiés tels qu'un mouvement combiné du genou en valgus/flexion/rotation latérale (Beynnon et al., 2005), en varus/flexion/rotation médiale, en hyperextension, ou encore à travers une rotation médiale forcée du genou (Wetters et al., 2016).

La force de translation antérieure joue un rôle majeur dans l'atteinte du ligament croisé antérieur, en particulier aux angles de 20 à 30° de flexion de genou, et peut être notée comme la force isolée la plus néfaste associée à la lésion du LCA (Alentorn-Geli et al., 2009a). Cependant, les actions combinées, comparativement aux actions isolées, jouent un rôle prépondérant dans cette atteinte. Ainsi, les rotations médiale et latérale, les moments de valgus et varus ne contraignent pas le LCA à l'ampleur des mouvements combinés tels qu'une force dirigée vers l'avant ajoutée au valgus ou à la rotation médiale.

2.1.2 Facteurs de risque anatomiques et morphologiques

Il semble primordial d'identifier des facteurs de risques facilitant la survenue de ces mécanismes. Des recherches existent concernant les facteurs de risques extrinsèques à la blessure du LCA, mais aucun des critères tels que les conditions climatiques, les caractéristiques des surfaces de jeu ou des chaussures n'ont été identifiés comme significativement influents sur la survenue d'une rupture du LCA (Alentorn-Geli et al., 2009a).

Des facteurs anatomiques tels que l'angle Q (i.e. l'angle entre l'insertion du quadriceps sur la patella et la ligne formée par le ligament patellaire), la géométrie du plateau tibial, l'incidence de l'échancrure fémorale, la taille du LCA, la laxité articulaire ont été développés et semblent influencer l'apparition des blessures. Cependant, ce sont des facteurs morphologiques non modifiables, ce qui induit un faible potentiel préventif. Néanmoins, l'identification de ces facteurs anatomiques peut être utile pour déterminer le risque de blessure et ne fera que renforcer la nécessité d'une mise en place d'une action de prévention primaire. Toutefois, il semble surtout nécessaire de s'intéresser aux facteurs de risque modifiables et à potentiel évolutif. Nous nous sommes donc intéressés aux facteurs de risque dans les différents plans biomécaniques puisqu'ils semblent être la clé de la pathogénie du LCA et permettent de proposer des programmes de prévention secondaire et tertiaire.

Dans le plan sagittal, il est nécessaire de s'intéresser à la mobilité en flexion de tronc, de hanche, de genou et de cheville lors de l'exécution de tâches sportives. Plus l'amorti est important (grâce à une flexion des différentes articulations), plus l'énergie est absorbée et moins l'impact est transféré aux genoux. Une posture moins érigée lors de l'atterrissage a été associée à une réduction du risque de blessure au LCA (Malfait et al., 2016).

L'inclinaison pelvienne antérieure peut, elle aussi, avoir un rôle dans la biomécanique de rupture du LCA. Elle place la hanche dans une position de rotation médiale, d'antéversion et de flexion, ce qui allonge et affaiblit les ischio-jambiers et modifie le bras de levier des muscles fessiers (Alentorn-Geli et al., 2009a). Les muscles ischio-jambiers sont importants pour prévenir le recurvatum de genou en statique comme en dynamique et pour empêcher le déplacement antérieur du tibia qui met en tension le ligament croisé. Les muscles fessiers sont importants pour contrôler la flexion de hanche et pour empêcher un effondrement dynamique du valgus de genou. Néanmoins, le degré exact d'inclinaison pelvienne antérieure directement corrélé à la lésion du LCA reste controversé. L'origine du risque est discutée, afin de savoir s'il est causé par la position pelvienne altérée en elle-même ou par le désalignement fonctionnel qu'elle crée (Sigward & Pollard, 2018).

Le lien entre la flexion de hanche et le risque de blessure au LCA a également été étayé par des analyses vidéo. Elles ont montré que les blessures au LCA se produisaient avec une flexion de hanche plus importante immédiatement après l'atterrissage par rapport aux atterrissages contrôlés et progressifs (Fox et al., 2016). En effet, une flexion de hanche exagérée lors du contact initial peut entraîner le tronc vers l'avant et l'éloigner de l'appui au sol ce qui engendre un déplacement du centre de pression dans une direction antérieure et latérale, et augmente la mise en tension du LCA. Kotsifaki et al. (2020), ont montré des moments de flexion de genou inférieurs au niveau de la jambe opérée. Ces données montrent que l'absorption de la puissance est donc plus faible au niveau du genou reconstruit et peut potentiellement influencer le risque de récurrence puisque la flexion de genou protège des lésions du LCA.

Au niveau de la cheville, des amplitudes de flexion dorsale de cheville moins importantes lors d'un changement de direction au niveau de la jambe opérée sont retrouvées, mais aussi au niveau de la jambe saine comparativement à des sujets sains (Wren et al., 2018). Des atterrissages sur l'avant-pied semblent être directement corrélés à un alignement du membre inférieur dans le plan frontal et donc à une réduction du valgus de genou. Il apparaît donc nécessaire de parvenir à des atterrissages contrôlés durant lesquels les réceptions sont fléchies, amorties et progressives.

Dans le plan frontal, il est important de considérer les mouvements d'inclinaison du tronc semblant être plus présents chez les athlètes opérés du LCA que chez des sujets sains. Le déplacement latéral du tronc est l'élément prédicteur le plus puissant de lésion ligamentaire dans ce plan d'analyse (Alentorn-Geli et al., 2009a). En effet, il est le reflet des charges subies par le genou et d'un contrôle neuromoteur déficitaire qui occasionne l'aide du tronc pour s'équilibrer. Cette dernière entraîne un déplacement latéral du centre de gravité de l'athlète créant un vecteur de force pouvant augmenter le valgus du genou (Fox et al., 2016).

Au niveau de la hanche, l'augmentation du moment d'adduction peut entraîner une augmentation du valgus de genou, mais l'adduction de la hanche elle-même n'a pas été démontrée comme un facteur de risque de lésion du LCA. En effet, le valgus de genou appartient au pattern de risque de blessure, les sujets lésés au LCA ayant un moment d'abduction du tibia par rapport au fémur 2,5 fois plus important (Sigward et al., 2014). Comparativement aux individus en bonne santé, les patients traités par reconstruction du LCA atterrissent avec des moments plus longs d'abduction du tibia par rapport au fémur (Kotsifaki et al., 2020).

Dans le plan transversal, les rotations présentes au niveau de la hanche peuvent influencer la survenue d'une rupture du LCA. Plus précisément, une plus grande rotation médiale de hanche a été associée à des moments d'abduction du tibia plus importants. Une rotation médiale excessive de hanche peut induire une position de valgus dynamique de genou, dans laquelle le genou se déplace en dedans alors que le pied reste en contact avec le sol (Fox et al., 2016).

L'excès de pronation du pied peut également avoir un rôle dans cette lésion. Physiologiquement, la pronation de l'articulation sous-talienne et la rotation médiale du tibia se produisent uniquement pendant la phase de contact de la démarche. Si la pronation se produit au-delà de cette phase, le tibia reste en rotation médiale empêchant la survenue d'une supination de l'articulation sous-talienne et d'une rotation latérale du tibia. Cette rotation tibiale médiale excessive transmet des forces anormales vers le haut dans la chaîne cinétique. Le mouvement étant forcé avec le pied fixé au sol et une rotation médiale du tibia, le LCA peut être soumis à des contraintes plus importantes pouvant provoquer une rupture. Cette pronation associée à la rotation tibiale médiale peut produire une rotation fémorale

médiale et une angulation du valgus de genou accrues, augmentant le risque de lésion du LCA (Tran et al., 2016).

2.1.3 Contrôle neuromusculaire et blessure du LCA

Outre son rôle mécanique dans le maintien de la stabilité du genou, le LCA contient des mécanorécepteurs, de type I, sensibles à l'étirement et influence donc directement le contrôle neuromusculaire du genou. Une atteinte du LCA provoque une désafférentation partielle et altère le contrôle moteur rachidien et supraspinal. Les modifications de la stratégie de contrôle moteur peuvent révéler des modifications de la proprioception, du contrôle postural, de la force musculaire, des mouvements et des schémas de recrutement. Une lésion du LCA doit donc aussi être considérée comme un dysfonctionnement neurophysiologique.

Le contrôle neuromusculaire est un facteur de risque prépondérant dans la survenue de cette blessure. Il fait référence à l'activation inconsciente des contraintes dynamiques entourant une articulation en réponse à des stimuli sensoriels. Le système neuromusculaire génère du mouvement et détermine la biomécanique des actions de jeu. L'activation musculaire est cruciale lors de nombreuses activités sportives et les différences de contrôle neuromusculaire peuvent expliquer, en partie, le risque accru de blessure au LCA. Le principal facteur de risque neuromusculaire identifié dans la littérature implique le contrôle du valgus dynamique du genou.

Comme nous l'avons évoqué, il est établi que l'atterrissage à partir d'un saut est l'un des principaux mécanismes de rupture sans contact. Lors de l'atterrissage, les extrémités inférieures absorbent les forces par flexion articulaire. La protection de l'articulation est assurée par la stabilisation dynamique mise en place grâce au système de contrôle neuromusculaire. Les coordinations musculaires agonistes-antagonistes sont donc essentielles pour la stabilité articulaire. Pour l'articulation du genou, la co-activation des fléchisseurs et des extenseurs est essentielle pour prévenir ou réduire le mouvement de l'articulation et les charges qui augmentent le risque de blessure. Plus précisément, le muscle quadriceps provoque une tension maximale du LCA autour de 30° de flexion du genou. Le recrutement des ischio-jambiers réduit la mise en charge du LCA causée par le quadriceps et peut aider à fournir une stabilité dynamique du genou (Withrow et al., 2008). Ces schémas sont souvent retrouvés chez les femmes pratiquant un sport de pivot lors de la phase précédant l'atterrissage, avec une activation élevée des quadriceps et une diminution de l'activation des ischio-jambiers. Cela peut entraîner une augmentation de la charge du LCA pendant l'atterrissage de la tâche d'arrêt-saut et le risque de blessure au LCA sans contact (Chappell et al., 2007).

Il semble donc important d'évoquer la force des quadriceps et des ischio-jambiers comme facteur de risque, mais surtout le ratio de ces deux muscles afin de protéger le LCA. En effet, Ward et al. (2018), ont montré qu'une plus grande force du quadriceps était corrélée positivement à la biomécanique de

réception des athlètes. D'autre part, des ischio-jambiers faibles contribuent à une plus grande force de réaction au sol qui place le LCA à un risque plus élevé de rupture. Une activation et une force suffisantes des ischio-jambiers sont nécessaires pour équilibrer le moment d'extension produit par les quadriceps et pour résister à la translation tibiale antérieure et latérale ainsi qu'aux rotations tibiales transversales (Hewett et al., 2006).

De plus, la fatigue musculaire pourrait être un facteur de risque de lésions ligamentaires. Les muscles « fatigués » sont capables d'absorber moins d'énergie avant d'atteindre le degré d'étirement ligamentaire impliqué dans les blessures. Le contrôle neuromusculaire amélioré peut aider l'athlète à mieux absorber l'énergie, laissant moins de contraintes énergétiques pour d'autres structures telles que les ligaments. Dans des conditions de fatigue, il a été montré que les hommes et les femmes diminuent l'angle de flexion du genou et augmentent la force de cisaillement antérieur tibial et les moments de varus du genou lors de l'exécution des tâches d'arrêt-saut (Bourne et al., 2019). Ce schéma pourrait représenter des tentatives compensatoires de stabilisation dynamique du genou au cours de la phase de changement de direction mettant en contrainte le ligament. Par conséquent, McLean et al. (2007), concluent que les modifications induites par la fatigue dans le contrôle des membres inférieurs peuvent augmenter le risque de blessure au LCA sans contact lors des atterrissages. Ainsi, il semble fondamental de pouvoir détecter les patterns à risque afin de travailler spécifiquement les éléments déficitaires en vue de permettre un retour au sport « sécurisé ».

2.2 Évaluation d'une personne opérée d'une plastie du LCA et critères de retour au sport

2.2.1 Concept de batterie de tests

Introduit dans les années 2000, le concept de batterie de tests a été suggéré afin de mesurer les capacités des sujets opérés du LCA. Cette batterie reprend l'évaluation des qualités musculaires, biomécaniques, et fonctionnelles des athlètes afin de déterminer leur faculté à retourner au sport. La batterie la plus couramment décrite et validée comporte trois tests pour la force musculaire des membres inférieurs (force, puissance, résistance) et trois tests de saut pour la performance fonctionnelle (vertical drop jump, single hop test et side hop test). Elle s'est avérée être fiable lorsqu'il s'agit de distinguer le côté pathologique du côté sain chez les patients après une blessure du LCA mais aussi après une reconstruction du LCA (Ardern et al., 2016). Le niveau de validation de cette batterie de tests varie mais en augmentant le niveau de validation de symétrie des membres de 90% à 100%, les résultats étaient naturellement plus faibles pour chacun des tests individuels.

Dans le cadre de sports de pivot, il est ainsi recommandé, en utilisant le critère d'un indice de symétrie des membres (LSI) dans les trois tests de force, ainsi que dans les trois tests de saut, d'obtenir un LSI supérieur ou égal à 100% (Thomeé et al., 2012a).

2.2.2 Tests de force musculaire

L'évaluation isocinétique est actuellement le test de référence (gold-standard) pour l'évaluation de la force musculaire, bien qu'elle soit critiquée pour son manque de pertinence fonctionnelle. Il s'agit d'un outil fiable et reproductible afin de mesurer les capacités du sportif à reprendre son activité sportive (Cvjetkovic et al., 2015). La force musculaire est le critère de reprise le plus souvent déclaré, étant donné que les extenseurs et fléchisseurs de genou jouent un rôle important dans la stratégie de contrôle moteur. Il semble adéquat d'inclure des critères de force et de résistance dans le processus de décision de reprise sportive (A. J. M. Rambaud et al., 2018).

Il est recommandé d'utiliser un mode d'évaluation concentrique et excentrique, dans la course musculaire totale. L'extraction des données repose sur un LSI. Le couple maximal (ou couple de pointe) de chaque muscle est à prendre en considération car il présente une grande fiabilité test-retest et donne une mesure précise de la force des extenseurs et des fléchisseurs de genou. Les sujets sont donc invités à produire leur force maximale. Le couple maximal diminue lorsque la vitesse angulaire augmente au-dessus de 60°/s, puisque le couple de sortie maximal se situe entre 0 et 60°/s. Pour cette raison, si la vitesse angulaire utilisée pour l'évaluation de la force est supérieure à 60°/s, les déficits pourraient ne pas être mis en évidence et nous pourrions supposer à tort que le critère est validé.

Bien que le couple excentrique soit nettement supérieur au couple concentrique et pourrait donc être trompeur, s'il était utilisé seul, la contraction excentrique sera plus difficile à exécuter pour le sportif car elle nécessite une grande habileté et un meilleur contrôle moteur que la contraction concentrique. Les fiabilités pour l'extension et la flexion isocinétiques concentriques et excentriques du genou demeurent élevées. Cependant, dans un grand nombre d'études, la fiabilité et la reproductibilité de l'extension et de la flexion excentriques du genou sont inférieures à celles de la contraction concentrique (Undheim et al., 2015).

Le rapport du couple fléchisseurs sur le couple extenseurs de genou est calculé pour chaque mode et vitesse de contraction du côté opéré, avec un rapport $\geq 60\%$ considéré comme physiologiquement suffisant pour obtenir un contrôle articulaire (Kim & Hong, 2011). Un rapport fonctionnel mixte, associant les performances excentriques des fléchisseurs (à 30°/s) et les performances concentriques des extenseurs (à 240°/s) est également évalué. Un ratio supérieur à 1 est corrélé à la diminution des blessures (Croisier et al., 2008). Les trois tests musculaires recommandés afin d'obtenir ces valeurs sont donc : un test de force maximale en concentrique à vitesse lente, un test de puissance maximale en concentrique à vitesse rapide et un test de résistance excentrique.

A l'issue d'un test isocinétique, obtenir 10% ou moins de déficit musculaire comparativement à la jambe saine demeure être un consensus lorsque le sportif souhaite reprendre le sport à une haute intensité et sans contre-indication (van Melick et al., 2016). Certains auteurs recommandent même

de retrouver 100% de symétrie pour des activités contraignantes comme les sports de pivot-contact (Thoméé et al., 2011 ; Dingenen & Gokeler, 2017). Ces données corroborent avec le fait que peu de patients sont capables d'atteindre de tels niveaux d'exigence à six mois de leur opération et qu'il ne faut pas baser la décision de retour au sport uniquement sur le délai post-opératoire.

2.2.3 Tests fonctionnels

Les tests de sauts permettent d'évaluer la récupération de la force musculaire et son application en pratique afin d'établir si le patient est prêt à retourner à son activité sportive. Les trois tests principalement utilisés sont le single hop test, le side hop test et le Vertical Drop Jump (Alli Gokeler et al., 2017). Bien qu'il soit moins utilisé, le crossover hop test permet d'identifier avec une sensibilité de 88% les personnes ayant une fonction normale. Ceci est probablement dû au fait que de tous les tests, il est le plus exigeant sur le plan fonctionnel, car il nécessite de la coordination et de la force dans les plans frontal, sagittal et transversal. Un LSI se rapprochant de 100% dans ce test indiquent une amélioration du contrôle neuromusculaire de la jambe (Abrams et al., 2014).

En effet, les résultats des tests de sauts (hop tests) permettent également d'établir un LSI. Il est recommandé d'obtenir un LSI supérieur à 85% pour les sports dans l'axe (Rambaud et al., 2015) et un LSI supérieur à 90% pour les sports de pivots (Thoméé et al., 2011). Les données actuelles suggèrent que la restauration de la symétrie de la distance de saut ne garantit pas que la cinématique du genou soit restaurée après une reconstruction du LCA. Bien que la majorité des patients opérés présentent un indice de symétrie des membres compris entre 85% et 95% lors du single hop test pour la distance, il existe une gamme de déficits biomécaniques dans la plupart des résultats par rapport à la jambe controlatérale (Kotsifaki et al., 2020). Cet indice de symétrie est à tempérer puisque Wren et al. (2018), ont montré que les sujets qui obtenaient un LSI supérieur à 90% avaient tendance à parcourir une distance plus courte, ce qui suggère que la symétrie peut être obtenue, en partie, en diminuant la réalisation de la tâche du côté non opératoire. De plus, Abrams et al. (2014), ont montré que dans leur étude les sujets testés présentaient tous un LSI supérieur à 90%. Les différences cinématiques sont donc susceptibles de nous fournir des informations plus utiles que l'agrégat simpliste de distance. Il est proposé que ces données soient considérées comme des critères de reprise du sport (Kotsifaki et al., 2020). Les dernières recommandations pour les batteries de tests incluent une analyse de la réception de l'athlète (Dingenen & Gokeler, 2017 ; DiFabio et al., 2018).

2.3 Méthodes d'évaluation qualitative du contrôle neuromusculaire

Les protocoles existants n'évaluent que rarement le contrôle neuromusculaire du genou alors que cela représente un risque majeur de rupture du LCA (Kyritsis et al., 2016). Comme nous l'avons évoqué, les dernières recommandations incluent une analyse de la réception de l'athlète afin de déterminer son retour au sport. L'évaluation du contrôle neuromusculaire peut être réalisée à l'aide de l'analyse

vidéo. Bien que l'analyse tridimensionnelle soit décrite comme le gold-standard pour l'évaluation cinématique, l'analyse bidimensionnelle du mouvement du genou dans le plan frontal peut s'avérer fiable (Munro et al., 2012).

D'après Paterno et al. (2010), l'analyse vidéo de la cinématique dans le plan frontal lors d'une réception comme celle du Drop Vertical Jump (DVJ), semble être un outil pertinent pour détecter une biomécanique déficitaire qui pourrait être évocatrice d'une altération neuromusculaire. Ils indiquent qu'une rotation médiale de hanche, un déficit de flexion du genou ou valgus dynamique de genou lors du contact initial, ainsi qu'un déficit de stabilité posturale peuvent prédire avec une sensibilité (92%) et spécificité (88%) élevées une récurrence de rupture du ligament croisé. Finalement, il a été exposé que ces indicateurs d'un mauvais contrôle neuromusculaire étaient prédictives des lésions du LCA dans une population en bonne santé (Hewett et al., 2005). Cependant, ce test reste non spécifique à des sports de pivot et ne représente pas suffisamment les situations de blessures qui surviennent principalement lors de réceptions unipodales. Il semble donc nécessaire de développer des tests de dépistage avec des charges plus élevées sur le membre inférieur et des mouvements comparables à ce qui se passe dans les situations de blessures, comme les atterrissages déséquilibrés à une jambe ou les changements de direction (Krosshaug et al., 2016). Selon certains auteurs, la mesure de l'angle du valgus de genou dans le plan frontal peut être suffisant. Hewett et al. (2005), ont montré que les athlètes ayant subi une rupture du LCA obtenaient une abduction du tibia supérieure de $8,4^{\circ}$ au contact initial lors d'un DVJ et un angle de flexion maximale de genou à la réception inférieur de $10,5^{\circ}$ comparativement aux joueuses non blessées.

Enfin, des scores d'analyse qualitative peuvent être mis en place pour optimiser l'analyse vidéo. Seul le LESS-score a démontré une validité pronostique dans l'identification des lésions du LCA, lorsque le score était supérieur à 5 chez des athlètes de moins de quinze ans (Padua et al., 2015). Cependant, dans d'autres populations, il ne s'est pas révélé prédictif (James et al., 2016). Le LESS-score semble pratique pour une utilisation courante en raison du peu de matériel nécessaire et du temps d'installation et d'analyse requis. Il permet de démontrer de manière valide et fiable les sujets ayant une biomécanique déficitaire grâce à la considération du plan frontal et sagittal bien que sa prédictivité reste à établir (Fox et al., 2016).

Une version, adaptée par O'Connor en 2015, permet d'évaluer les réceptions unipodales sur un Single Leg Vertical Drop Jump. En effet, la rupture du LCA survient majoritairement lors d'une réception unipodale lorsque le joueur ressent de la fatigue et qu'il concentre son attention sur un élément extrinsèque, comme un but ou un adversaire (O'Connor, 2015). Un test doit donc reproduire fidèlement les mouvements du terrain afin de déterminer si le patient est prêt ou non à retrouver ce

type de situation. Une version corrigée du LESS-score telle que le SL-LESS-score semble donc pertinente afin de considérer au mieux l'atterrissage des sportifs.

2.4 Améliorer le contrôle neuromusculaire d'un patient opéré du LCA afin de lui permettre de reprendre le sport de manière sécurisée

L'entraînement au contrôle neuromusculaire est un type d'intervention préconisé pour atténuer les déficits et les anomalies des schémas de mouvement chez diverses populations de patients. A la suite d'une rupture du LCA, des schémas de mouvement et des comportements neuromusculaires anormaux sont couramment observés chez les athlètes. Les lignes directrices actuelles conseillent de compléter la rééducation par un travail du contrôle neuromusculaire, afin d'améliorer la fonction et d'atténuer les mouvements anormaux (van Melick et al., 2016).

2.4.1 Interventions pour des tests musculaires déficitaires

Des études récentes ont montré que la plupart des patients après une opération du LCA n'ont pas réussi à passer les critères RTS pour la force musculaire des quadriceps 6 et 9 mois après l'ACLR. D'après certains chercheurs, la restauration du couple de force des quadriceps nécessite une rééducation prolongée après une ACLR pouvant aller jusqu'à un minimum de 2 ans (C. V. Nagelli & Hewett, 2017). Cela peut être dû à des intensités et des volumes d'entraînement insuffisants. Selon les recommandations de l'American College of Sports Medicine, l'entraînement en force doit être effectué deux à trois fois par semaine, avec deux à quatre séries d'exercices comportant huit à douze répétitions, de 60 à 80% de l'intensité maximale afin d'optimiser l'hypertrophie musculaire. Lorsque les déficits de symétrie persistent, le protocole de renforcement peut être adapté, avec cinq séries de trois répétitions d'un même mouvement à plus de 80% de la charge maximale (Welling et al., 2019). Cependant, malgré un entraînement musculaire constant et intensif, 34,2 % des joueurs de football après le ACLR ont échoué au critère LSI >90 % pour la force musculaire du quadriceps et 28,9 % ont échoué au seuil >3,0 Nm/kg pour la jambe blessée à 10 mois (Welling et al., 2019). Il est conseillé de prolonger la rééducation et de s'entraîner plus fréquemment et avec une intensité plus élevée jusqu'à ce que les critères de force soient réussis.

2.4.2 Interventions pour des tests fonctionnels déficitaires

Lorsque les déficits fonctionnels sont prépondérants malgré une force musculaire convenable, d'autres exercices tels que des exercices d'équilibre, de stabilisation du tronc, de course, de techniques de saut et d'atterrissages peut être mis en place (Barendrecht et al., 2011 ; Welling et al., 2019). Il est conseillé aux cliniciens d'inclure une variété d'exercices, de créer des défis et d'utiliser un entraînement spécifique au sport dans le cadre de la réadaptation afin de maintenir la motivation et l'adhésion à un niveau élevé (Welling et al., 2019). Il est recommandé d'axer l'entraînement à partir

d'une analyse biomécanique avec un retour d'informations donné au sujet pendant et après l'entraînement.

La part fonctionnelle de l'entraînement au contrôle neuromusculaire a pour but d'améliorer la stabilité dynamique du genou par le biais des activations de la musculature environnante. Les mécanismes qui sous-tendent l'efficacité de l'entraînement neuromusculaire en tant qu'élément des programmes de prévention des lésions du LCA ont été démontrés, notamment les modifications de la cinématique du tronc et de la hanche (Hewett et al., 2017). Après un entraînement neuromusculaire se focalisant sur ces variables, ces mêmes athlètes présentent une biomécanique de hanche similaire à un groupe témoin sain.

L'objectif repose sur le perfectionnement de la technique pour chaque exercice ainsi que la réduction de la charge du LCA par une réduction du couple en valgus de genou (Myer et al., 2005). Pour cela, il est recommandé d'orienter l'entraînement sur des focalisations externes. Il a été clairement établi que l'utilisation d'instructions avec une focalisation externe entraîne de meilleures performances motrices que l'utilisation d'instructions avec une focalisation interne. Une attention extérieure accélère le processus d'apprentissage ou raccourcit les premières étapes de l'apprentissage en facilitant l'automatisation des mouvements. Une concentration sur l'effet du mouvement entraîne l'utilisation de processus inconscients ou automatiques, tandis qu'une concentration interne sur ses propres mouvements entraîne un type de contrôle plus conscient qui contraint le système moteur et perturbe les processus de contrôle automatique (Gokeler et al., 2019).

3 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer les effets d'un programme d'entraînement du contrôle neuromusculaire chez des sujets opérés du LCA depuis minimum six mois. Pour cela, une batterie de tests a été réalisée afin d'évaluer les besoins nécessaires à la poursuite de la rééducation et la capacité des sujets à reprendre leur sport après une reconstruction du LCA.

L'hypothèse principale était que la mise en place d'un protocole de travail du contrôle neuromusculaire permettrait d'améliorer cette qualité fonctionnelle, détectable grâce à une batterie de tests musculaires et fonctionnels.

4 Matériel et méthode

4.1 Caractéristiques de la population

Le groupe ayant participé à ce travail était composé de huit participants (4 femmes âgées de $20 \pm 2,9$ ans, taille $166,3 \pm 5,4$ cm, poids $64,5 \pm 7,3$ kg ; 4 hommes âgés de $25,25 \pm 3,2$ ans, taille $177 \pm 3,5$ cm, poids $78,3 \pm 5,9$ kg) (cf. Tableau 1). Les sujets se trouvaient à $10,4 \pm 4,9$ mois de l'opération au début de l'expérimentation. Chaque participant a été anonymisé dans le fichier de recueil de données par ses initiales. Le fichier de recueil des données ainsi que les vidéos des participants ont été

conservés sur le cloud de l'université de Nantes (UNCLOUD) afin de sécuriser leur stockage. La totalité des expérimentations s'est déroulée sur le site Le Goff du centre de kinésithérapie du sport « L'Ekipé » entre décembre 2019 et février 2020. L'étude n'est ni contrôlée, ni randomisée, ni menée en simple ou double aveugle puisque le groupe expérimental est formé sans comparaison avec un groupe contrôle. Les participants conscients de faire partie de cette étude.

4.2 Critères d'inclusion et d'exclusion

Les participants devaient être âgés de moins de trente ans afin d'obtenir un groupe homogène, pratiquer un sport de pivot et être opérés d'une chirurgie reconstructive du LCA datant de six mois au minimum le jour des premiers tests. Les critères de non inclusion étaient les suivants : antécédents de blessure au ligament croisé homolatéral ou controlatéral, antécédents de chirurgie du membre inférieur ou du tronc, blessures au membre inférieur ou au tronc datant de moins de six mois.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Groupe n=8
Age	24	17	20	24	30	23	19	24	22,6 ± 4
Genre (H/F)	H	F	F	F	H	H	F	H	4 / 4
Taille (cm)	178	160	173	167	180	178	165	172	71,4 ± 9,6
Poids (kg)	70	62	58	75	78	82	63	83	171,6 ± 7,1
Jambe dominante	G	G	D	G	D	D	D	G	4 / 4
Jambe opérée	D	D	D	G	G	G	D	G	4 / 4
Date de la chirurgie	Juillet 2019	Juillet 2018	Juin 2019	Juin 2019	Mars 2019	Avril 2019	Aout 2018	Mai 2019	
Type de chirurgie	KJ + renfort latéral	DIDT	KJ	DIDT + renfort latéral	DIDT	DIDT	DIDT + renfort latéral	DIDT	
Délai post-opératoire (mois)	6	18	6,5	7,5	9	10	18	8	9,5 ± 4,4
Sport pratiqué	Football	Football	Badminton	Football	Rugby	Rugby	Handball	Football	

Tableau 1 : caractéristiques des sujets

Abréviations : DIDT : technique opératoire utilisant le droit interne (vaste médial) et le demi-tendineux (semi-tendineux) ; KJ : technique opératoire initiée par Kenneth Jones impliquant le tendon patellaire

4.3 Méthodes

4.3.1 Dispositif de mesures

Le protocole d'entraînement au contrôle neuromusculaire était délimité par deux sessions d'évaluation qui se sont déroulées à cinq semaines d'intervalle. Au cours de la première session d'évaluation, tous les participants ont été informés de l'objectif de ce travail et ont fourni un consentement éclairé écrit (cf. Annexe I).

Lors des sessions d'évaluation ainsi que des séances d'entraînement, les participants ont été invités à se changer afin de se vêtir d'un short, d'un tee-shirt et de se trouver pieds-nus. Lors des sessions d'évaluation, l'échauffement était compris dans le test musculaire isocinétique. Les évaluations ont débuté par le test musculaire isocinétique afin d'engendrer de la fatigue pour la suite des tests. En effet, Dingenen & Gokeler (2017) affirment que le test de sportifs fatigués peut améliorer la capacité de détection des déficits cliniquement significatifs après une reconstruction du LCA.

4.3.2 Mesure des performances musculaires

Les performances ont été testées avec un dispositif isocinétique « CON-TREX MJ »[®] (CMV AG, Switzerland). Les sujets étaient assis, hanche fléchie à 85° et étaient attachés par deux ceintures au niveau de la poitrine et une sangle au niveau de l'extrémité distale du fémur afin d'éviter toute compensation au cours de l'évaluation (Rambaud et al., 2017 ; Maffiuletti et al., 2007). L'axe du dynamomètre était aligné avec le centre de rotation du genou (soit l'épicondyle fémoral latéral). Le support résistif était attaché à la jambe, 2 centimètres au-dessus des malléoles tibiales et fibulaires. Les amplitudes de mouvement ont été définies de 0° (ou par défaut l'extension maximale du sujet) à 100° de flexion de genou. La correction de la gravité a été utilisée. Si elle ne l'était pas, lors de mouvements concentriques, les scores de force des extenseurs seraient diminués en raison du mouvement ascendant agissant contre la gravité. Pour les fléchisseurs, les scores de force augmenteraient en raison du mouvement descendant agissant avec la gravité (Undheim et al., 2015). Trois modes d'évaluation musculaire ont été mis en place dans l'ordre suivant : un mode concentrique à 60°/s, un mode concentrique à 240°/s et un mode excentrique à 30°/s. La jambe saine a été testée en première. La session d'évaluation débutait par deux essais d'échauffement en concentrique à 60°/s afin de se familiariser avec l'outil puis les autres modes étaient précédés d'un seul essai d'échauffement. Chaque essai (échauffement ou évaluation) était suivi de 30 secondes de repos. Les consignes et encouragements étaient standardisés car ces éléments jouent un rôle majeur dans l'évaluation isocinétique (Rendos et al., 2019).

Après filtrage approprié, pour les essais d'évaluation, le logiciel calcule un grand nombre de paramètres. Nous ne conservons que le couple de pointe absolu, paramètre le plus reproductible (coefficient de corrélation intra-classe (CCI) > 0.96) (Rambaud et al., 2017). Chaque valeur est enregistrée pour chaque mode et vitesse de contraction pour les extenseurs et les fléchisseurs de genou. Des ratios de force fléchisseurs/extenseurs ont été établis selon les recommandations présentées dans la littérature (Kim & Hong, 2011).

4.3.3 Mesure des performances fonctionnelles

Une batterie de tests de sauts a été mise en place et s'est déroulée dans l'ordre suivant : single hop test pour la distance, triple hop test, crossover hop test, side hop test, vertical drop jump et single leg vertical drop jump. Tous les tests ont été supervisés par la même personne.

Les participants ont reçu les instructions verbales standardisées pour l'explication de chaque test fonctionnel (cf. Annexe II). La tâche n'a pas été démontrée afin de ne pas influencer sa réalisation par les participants. Ces derniers ont été autorisés à utiliser librement leurs bras pendant les tests de saut, et aucune normalisation n'a été donnée pour le positionnement de la jambe non impliquée afin d'assurer un modèle de mouvement le plus naturel possible.

Pour chaque test de saut, le sujet a débuté avec la jambe non opérée. Le sujet a disposé de trois sauts d'échauffement et de trois sauts évalués. La meilleure performance (distance maximale au centimètre près) était conservée. Si le sujet aboutissait à sa meilleure performance sur le troisième essai, un essai supplémentaire a été autorisé. Si la distance maximale a été atteinte au cours de ce quatrième essai, elle a été utilisée pour l'analyse des données.

Un test de saut a été considéré comme infructueux lorsque le participant a touché le sol avec les extrémités supérieures ou inférieure controlatérale, a perdu l'équilibre ou a eu besoin d'un sursaut supplémentaire après l'atterrissage initial. Un test de saut était considéré comme réussi si le participant était capable de maintenir l'atterrissage pendant au moins deux secondes. Après un essai raté, les participants ont eu rappel de la nécessité de maintenir l'équilibre pendant deux secondes à l'atterrissage et autorisés à effectuer une nouvelle tentative.

Lors du side hop test, en raison des trente secondes consécutives de saut pouvant générer de la fatigue, n'a été effectué qu'une seule fois. Le Vertical Drop Jump a été filmé au ralenti à l'aide d'une caméra type « iPhone » ® afin d'extraire les données de hauteur de saut et de temps de contact au sol grâce à l'application MyJump 2 (version 5.1 by Dr. Carlos Balsalobre-Fernandez).

Après chaque essai du même test, un intervalle de repos de 30 secondes a été utilisé. Pour minimiser la fatigue, une période de repos pouvant aller jusqu'à deux minutes a été prévue entre chacun des différents tests de saut.

4.4 Programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire proposé

Huit patients, suivis au centre, ont accepté de participer à un programme d'entraînement neuromusculaire de cinq semaines, selon les observations des tests réalisés. Selon une preuve de niveau I dans le dernier guide de recommandations de bonnes pratiques paru concernant la prise en charge des sujets opérés d'une reconstruction du LCA, un entraînement neuromusculaire et un entraînement excentrique devraient être ajoutés à l'entraînement en force afin d'optimiser les mesures de résultats lors de la phase de rééducation (van Melick et al., 2016). Le but de l'entraînement était

de réduire la charge du LCA par une réduction du couple en valgus, une réduction de l'avancée du genou sur le pied dans les mouvements de décélération et un contrôle de l'équilibre global du corps.

Lors de chaque séance, les participants ont débuté par un échauffement composé de foam-roll, à raison de 30 secondes sur chaque groupe musculaire des membres inférieurs (muscles intrinsèques du pied, triceps sural, quadriceps, ischio-jambiers, fessiers). Ils ont ensuite effectué des exercices dits « d'activation des fessiers » afin de les préparer à des tâches de contrôle neuromusculaire : éducatifs de squat, marche latérale, marche diagonale, travail en valgus/non-valgus, le tout à l'aide d'une bande élastique située au-dessus des genoux.

La majorité des exercices initiaux impliquait les deux jambes afin d'initier les sujets aux mouvements d'entraînement en toute sécurité. Au début, l'accent a été mis sur une position athlétique qui peut aider à obtenir un contrôle dynamique du centre de gravité du sujet. Des atterrissages contrôlés mettant l'accent sur la flexion profonde des genoux ont été utilisés pour débiter avec un retour verbal d'informations pour sensibiliser le sujet aux positions biomécaniquement indésirables. La position athlétique est une position fonctionnellement stable, avec les genoux fléchis de manière à ce que les patellas ne dépassent pas l'extrémité distale des orteils, le regard porté à l'horizontal, les pieds placés à la largeur des épaules et l'équilibre global maintenu. Il s'agissait de la position finale pour la plupart des exercices présents lors de l'entraînement.

Chaque séance d'entraînement était composée d'une phase de renforcement musculaire analytique sur isocinétisme et d'une phase de travail fonctionnel, sur chaque jambe. Comme pour la session d'évaluation, les sujets débutaient par le renforcement musculaire sur isocinétisme, afin que le travail fonctionnel se fasse dans des conditions de fatigue musculaire.

Lors du renforcement musculaire (unilatéral), l'installation du sujet est la même que lors du test isocinétique à l'exception du réglage des amplitudes qui s'effectuait ici de 0° (ou à défaut l'extension maximale du sujet) à 90°. Le renforcement débutait par une phase de travail concentrique à intensité maximale. Pour cela, il est demandé au sujet, de développer le maximum de force lors de six séries composées de trois répétitions de flexion et d'extension de genou. L'évolution se faisait par niveau, grâce au recensement des valeurs de travail total et de pic maximal à la fin des séries, la vitesse diminuant au cours de la progression. Ensuite, le renforcement excentrique était mis en place, à 80% de l'intensité maximale. Après initiation du patient et détermination de la valeur cible, il était demandé au sujet d'effectuer six séries de trois répétitions à une vitesse fixée à 30°/s, l'accent étant mis sur la qualité des courbes avant de pouvoir augmenter la difficulté, par palier de 10Nm.

Le travail fonctionnel était composé de six ateliers, déclinés en deux niveaux de difficulté. La progression au cours de ces ateliers est estimée selon la qualité de mouvement et l'évaluation de la gêne fonctionnelle du sujet après la séance. Au stade de rééducation des sujets, le protocole

d'entraînement mettait l'accent sur la perfection de la technique pour chaque exercice, afin de tendre vers leur réalisation unipodale. Lorsque le sujet pensait ne plus pouvoir effectuer l'exercice correctement (expression orale d'une fatigue naissante), l'exercice était arrêté. L'objectif de la séance d'entraînement suivante était de continuer à améliorer la technique tout en augmentant la durée, le volume ou l'intensité de l'exercice en formant le sujet à l'utilisation des techniques sécurisées dans des situations sportives imprévues. Chaque atelier comportait peu de répétitions afin que l'accent soit mis sur la qualité du mouvement. Ce circuit était réalisé deux fois par session d'entraînement. Chaque exercice est détaillé en Annexe III.

La course à pied se déroulait sur tapis de course, par séquence de trois minutes composées de 15 secondes d'effort et de 15 secondes de repos. La consigne reposait sur la recherche de la vitesse maximale, puisque le temps d'effort était relativement court. L'objectif était d'encadrer la reprise de course à pied et d'effectuer un travail d'appuis dynamiques, symétriques, sans douleur ni boiterie.

L'exercice du damier permettait d'effectuer un travail d'amorti lors d'un enchaînement de sauts, réceptions et pivots. En partant d'une case centrale, il était demandé au sujet d'effectuer un saut quart de tour pour se réceptionner de façon amortie sur la jambe controlatérale à celle de départ dans chacune des cases du damier. Le sujet devait repasser par la case centrale entre chaque essai. En progression, le sujet effectuait un saut cloche pied amorti dans chacune des cases.

L'échelle de rythme permet d'effectuer un travail d'appuis avec accélération, décélération et changement de direction. Elle permet aussi d'améliorer l'amorti lors d'une réception après un saut d'obstacle. En effet, le sujet effectuait des appuis alternés à l'intérieur et à l'extérieur de l'échelle. Des haies étaient placées parallèlement à l'échelle. Lorsque le sujet se retrouvait à leur niveau, il devait les franchir pour se réceptionner sur la jambe controlatérale de façon amortie. Il effectuait un premier aller en avant, un retour en arrière, puis un aller-retour en déplacements latéraux. L'évolution de cet exercice reposait sur sa réalisation cloche-pied, les haies étant ici placées perpendiculairement.

L'exercice sur boîte de 40cm permet un travail pliométrique. Les appuis sont bipodaux mais il est demandé de déporter le poids du corps sur la jambe opérée. Le patient devait réaliser trois répétitions de sauts amortis sur cette boîte, provoquant un minimum de bruit. A la suite de cet amorti, il devait effectuer la même réception en redescendant de la boîte en arrière. Il effectuait ensuite la même action mais en se présentant latéralement à la boîte d'un côté puis de l'autre. Une phase d'amorti-enchaînée était ensuite demandée. Le sujet partait de la boîte, se réceptionnait au sol en arrière le plus rapidement possible et effectuait une réception amortie à son retour sur la boîte. Il réalisait aussi cette action latéralement. L'objectif était d'améliorer la qualité pliométrique et le rebond en augmentant la contrainte avec la hauteur et la charge sur membre lésé. L'évolution de cet exercice reposait sur sa réalisation cloche-pied.

L'exercice de l'horloge permet un travail proprioceptif, d'équilibre et de stabilité dynamique. Le sujet était placé au centre d'une horloge, en appui unipodal, genou déverrouillé, et devait essayer de toucher les douze points de l'horloge avec la main opposée à la jambe en appui.

Un travail sur « TRX » ® ou équivalent était mis en place afin d'effectuer cinq squats bulgares de face puis de profil. L'évolution de cet atelier consistait à effectuer les squats bulgares de façon « sautée ». L'objectif est un renforcement musculaire unipodal en chaîne fermée, permettant de travailler la stabilité et l'amorti à la suite d'un saut.

L'exercice du slide se réalisait sur « Flowin » ® ou équivalent. Le sujet venait placer un patin sous chacun de ses pieds et effectuer cinq fentes alternées de face et de profil. L'objectif de cet exercice est un travail de stabilité dynamique et excentrique des membres inférieurs.

4.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec le logiciel SPSS (version 25, IBM Corp. Armonk, NY: IBM Corp), entre les deux temps d'évaluation : pré-/post-intervention. Les résultats sont rapportés en termes de différence moyenne (post-pré) avec un intervalle de confiance à 95% (IC95).

Lors des sessions d'évaluation, chaque valeur maximale a été enregistrée comme mesure principale des résultats. Cela nous a permis d'établir un LSI en divisant le score de force ou de saut de la jambe saine par celui de la jambe opérée, multiplié par 100 (A. Gokeler et al., 2017 ; Lynch et al., 2015). Nous avons déterminé les valeurs LSI pour l'ensemble des tests musculaires, et tests fonctionnels mais aussi pour la batterie complète (i. e. les tests musculaires et les tests fonctionnels cumulés).

La normalité des valeurs a été vérifiée grâce au test de Shapiro-Wilk. Le t-test paramétrique de Student apparié a été effectué pour les valeurs normales et le test non paramétrique de Wilcoxon a été utilisé pour lorsque les données ne suivaient pas une distribution normale. Les différences étaient jugées significatives pour un seuil défini tel que $p < .05$. Nous avons interrogé les relations entre le délai post-opératoire et l'indice de symétrie de la batterie complète ainsi que des différents tests pris isolément, mais aussi entre les valeurs initiales et la progression de ces valeurs pour chaque sujet dans les différentes composantes pour identifier la variabilité interindividuelle, grâce au coefficient de Pearson pour les valeurs normales et grâce au coefficient de Spearman pour les valeurs non normales. Le seuil de significativité a été défini tel que $p < 0.05$.

La proportion de participants passant différents niveaux de coupure pour l'indice de symétrie des membres ($\geq 80\%$, $\geq 85\%$, $\geq 90\%$, $\geq 95\%$, $\geq 100\%$), avant et après l'intervention afin de s'intéresser aux critères de validation de retour au sport.

5 Résultats

5.1 Effets de l'intervention sur la force musculaire

5.1.1 Au niveau de chaque membre inférieur

Les résultats sont détaillés dans le Tableau 2.

	Différence moyenne (en Nm, (IC95))	P-value
Q – JAMBE SAIN		
Concentrique 60°/s	9,6 (-4,7 ; 24,0)	0,157
Concentrique 240°/s	5,9 (-3,4 ; 15,2)	0,178
Excentrique 30°/s	4,6 (-18,6 ; 27,9)	0,653
Q – JAMBE OPEREE		
Concentrique 60°/s	13,3 (6,8 ; 19,8)	0,002*
Concentrique 240°/s	12,0 (6,0 ; 18,0)	0,002*
Excentrique 30°/s	15,1 (-12,8 ; 43,1)	0,241
IJ – JAMBE SAIN		
Concentrique 60°/s	5,0 (-2,8 ; 12,8)	0,175
Concentrique 240°/s	0,9 (-5,9 ; 4,1)	0,692
Excentrique 30°/s	11,0 (-0,2 ; 22,2)	0,053
IJ – JAMBE OPEREE		
Concentrique 60°/s	16,6 (9,5 ; 23,8)	0,001*
Concentrique 240°/s	11,6 (7,8 ; 15,4)	0,000*
Excentrique 30°/s	14,0 (3,7 ; 24,2)	0,014*
RATIO IJ/Q - JAMBE SAIN		
Concentrique 60°/s	0,02 (-0,73 ; 0,11)	0,662
Concentrique 240°	-0,04 (-0,09 ; 0,01)	0,124
Excentrique 30°s (IJ) / Concentrique 240°/s (Q)	0,06 (-0,03 ; 0,23)	0,609
RATIO IJ/Q - JAMBE BLESSEE		
Concentrique 60°/s	0,08 (0,03 ; 0,13)	0,010*
Concentrique 240°	0,36 (-0,007 ; 0,08)	0,094
Excentrique 30°s (IJ) / Concentrique 240°/s (Q)	-0,03 (-0,19 ; 0,13)	0,666

Tableau 2 : comparaison pré/post-intervention des scores de force musculaire : valeurs absolues et ratios entre les fléchisseurs (IJ) et les extenseurs (Q) pour la jambe opérée et la jambe saine dans le cadre d'une batterie de tests à la suite d'une reconstruction du LCA.

Abréviations : IC95 : intervalle de confiance à 95% ; Q : extenseurs du genou (quadriceps) ; IJ : fléchisseurs du genou (ischio-jambiers) ;

** : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.*

Les valeurs de force musculaire déterminées à l'aide du test isocinétique ont été augmentées dans tous les modes de contraction, aussi bien au niveau de la jambe saine (+4,3% (IC95 = -4,9 ; 13,5), $p = .307$) pour le couple extenseur et +5,0% (IC95 = -0,5 ; 10,5), $p = .07$ pour le couple fléchisseur) que de la jambe opérée (+10,3% (IC95 = 2,3 ; 18,3), $p = .018$) pour le couple extenseur et +15,2% (IC95 = 10,4 ; 20,0), $p < .001$ pour le couple fléchisseur).

Au niveau de la jambe opérée, l'intervention a permis d'augmenter le couple maximal des extenseurs en concentrique (60°/s : +10,5% (IC95 = 5,3 ; 15,7), $p = .002$; 240°/s : + 13,2% (IC95 = 6,6 ; 19,8), $p = .002$) ainsi que celui des fléchisseurs dans tous les modes de contraction (60°/s : +18,2% (IC95 = 10,35 ; 26,02), $p = .001$; 240°/s : +16,5% (IC95 = 11,06 ; 21,9), $p < .001$; 30°/s : +12,1% (IC95 = 3,3 ; 20,9), $p = .014$). Au niveau de la jambe saine, le protocole n'a pas permis d'améliorations statistiquement significatives (toutes p -values $> .05$). En ce qui concerne les ratios agonistes/antagonistes, seul le ratio de la jambe blessée en concentrique à 60°/s est amélioré significativement (+8% (IC95 = 2,6 ; 13,3), $p = .01$).

Nous avons retrouvé des corrélations entre les valeurs initial du couple fléchisseurs du genou à 60°/sec et la progression des sujets ($r(8) = -.724$, $p = .042$) ainsi qu'à 240°/s ($r(8) = -.919$, $p = .001$) (cf. Annexe IV-Tableau I).

5.1.2 Au niveau de la symétrie (i.e., membre sain *versus* membre opéré)

Nous avons aussi interrogé les indices de symétrie des membres à l'issue des résultats du test isocinétique seul. Avant le protocole d'entraînement du contrôle neuromusculaire, deux des huit participants obtenaient plus de 40% de déficit de force musculaire sur la jambe opérée comparativement à la jambe saine, contre un seul après le programme. Nous observons également une amélioration du nombre de sujets au seuil de 85% de symétrie, avec trois sujets supplémentaires l'atteignant à l'issue du protocole, portant son nombre à cinq sur huit.

Au niveau des extenseurs, l'intervention a permis l'amélioration du ratio de la jambe opérée sur la jambe saine uniquement en mode concentrique 240°/s (+6,1% (IC95 = 0,6 ; 11,6), $p = .011$). Au niveau des fléchisseurs, nous observons une progression significative dans les deux modes concentriques (60°/s : +10% (IC95 = 0,2 ; 19,8), $p = .034$; 240°/s : + 18,9% (IC95 = 5,9 ; 31,8), $p = .047$). Les résultats sont précisés dans le Tableau 3.

	Différence moyenne (en %, (IC95))	P-value
Q		
CONC60°/s	2,6 (-5,5 ; 10,7)	0,469
CONC240°/s	6,1 (0,6 ; 11,6)	0,011*
EXC30°/s	0,63 (-26,0 ; 27,3)	0,957
IJ		
CONC60°/s	10,0 (0,2 ; 19,8)	0,047*
CONC240°/s	18,9 (5,9 ; 31,8)	0,011*
EXC30°/s	2,8 (-3,8 ; 9,3)	0,353

Tableau 3 : comparaison pré/post-intervention des indices de symétrie des membres obtenus lors des sessions d'évaluation sur isocinétisme

*Abréviations : IC95 : intervalle de confiance à 95% ; Q : extenseurs du genou (quadriceps), IJ : fléchisseurs du genou (ischio-jambiers) CONC : concentrique ; EXC : excentrique ; * : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.*

5.2 Effets de l'intervention sur les tests fonctionnels

5.2.1 Au niveau de chaque membre inférieur

Tous les résultats sont détaillés dans le Tableau 4.

D'un point de vue fonctionnel, au niveau de la jambe opérée, nous recensons des améliorations significatives pour le crossover hop test (+7,3% (IC95= 1,7 ; 12,8), $p= .017$), pour le side hop test (+8,7% (IC95 = 4,6 ; 12,8), $p= .002$), pour le Vertical Drop jump aussi bien pour le temps de contact au sol (-12% (IC95 = -20,52 ; -4,6), $p= .012$) que la hauteur (+19,4% (IC95 = 2,9 ; 35,7), $p= .026$). Au niveau de la jambe saine, deux critères ont été améliorés : le nombre d'appuis lors du side hop test (+18,5% (IC95 = 6,2 ; 30,8), $p= .009$) et le temps de contact au sol lors du Vertical Drop Jump (-5,5% (IC95 = -26,6 ; -1,3), $p= .025$). Pour les valeurs du Vertical Drop Jump, réalisé sur deux jambes, seul le temps de contact au sol a été diminué significativement (-11,1% (IC95 = -19,0 ; -4,3) $p= .03$). Parmi les valeurs statistiquement significatives, le progrès du side hop test est la seule valeur qui possède une corrélation significative entre les valeurs initiales et la progression ($r(8)=-.877$, $p=.004$) (cf. Tableau II Annexe V).

	Différence moyenne (IC95)	P-value
SINGLE HOP TEST		
Jambe saine (cm)	42,3 (-1,0 ; 140,0)	0,075
Jambe opérée (cm)	28,5 (-13,7 ; 70,7)	0,154
TRIPLE HOP TEST		
Jambe saine (cm)	26,38 (-4,9 ; 57,6)	0,086
Jambe opérée (cm)	9,5 (-7,2 ; 26,2)	0,221
CROSSOVER HOP TEST		
Jambe saine (cm)	15,1 (-14,7 ; 45,0)	0,270
Jambe opérée (cm)	27,88 (6,6 ; 49,2)	0,017*
SIDE HOP TEST		
Jambe saine	4,75 (1,6 ; 7,9)	0,009*
Jambe opérée	2,25 (1,2 ; 3,3)	0,002*
VERTICAL DROP JUMP		
2 jambes		
TCS (ms)	- 49,75 (-96,5 ; -2,5)	0,030*
Hauteur (cm)	1,03 (0,4 ; 2,4)	0,130
Jambe saine		
TCS (ms)	-12,3 (-59,5 ; -3,0)	0,025*
Hauteur (cm)	0,16 (-1,6 ; 2,0)	0,833
Jambe opérée		
TCS (ms)	-57,3 (-98,0 ; -22,0)	0,012*
Hauteur (cm)	2,72 (0,4 ; 5,0)	0,026*

Tableau 4 : comparaison pré/post-intervention des valeurs obtenues lors des tests fonctionnels

Abréviations : IC95 : intervalle de confiance à 95% ; TCS : temps de contact au sol ;

** : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.*

5.2.2 Au niveau de la symétrie (i.e. membre sain *versus* membre opéré)

Nous avons interrogé l'évolution de la symétrie des membres sur les différents tests de saut. Les résultats sont développés dans le Tableau 5. Avant l'intervention, deux des sujets possédaient plus de 40% de déficit comparativement à la jambe saine, contre un seul après. Le protocole a permis d'améliorer le nombre de participants atteignant un seuil de symétrie de 80%, passant de trois à six. Elle a aussi permis à quatre sujets d'atteindre les 90% de LSI, alors qu'aucun n'y parvenait lors des pré-tests. Seule la différence obtenue de la symétrie lors de la mesure du temps de contact au sol lors du Vertical Drop Jump s'est avérée statistiquement significative (+26% (IC95 = 6,1 ; 45,6), $p = .018$).

	Différence moyenne (en %, IC95)	P-value
Single Hop Test	2,5 (-5,4 ; 29,8)	0,575
Triple Hop Test	-1,5 (-10,8 ; 5,1)	0,161
Crossover Hop Test	2,9 (-0,3 ; 7,4)	0,069
Side Hop Test	-5,2 (-19,2 ; 5,5)	0,208
Vertical Drop Jump		
TCS	25,80 (6,06 ; 45,56)	0,018*
Hauteur	17,82 (-8,7 ; 44,35)	0,156

Tableau 5 : comparaison pré/post-intervention des indices de symétrie des membres obtenus lors des sessions d'évaluation sur isocinétisme

Abréviations : IC95 : intervalle de confiance à 95% ; TCS : temps de contact au sol ;

* : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.

5.3 Réussite de la batterie de tests

En ce qui concerne la validation complète des tests (i.e. obtenir un indice de symétrie $\geq 90\%$ pour les tests musculaires et fonctionnels), un seul participant obtenait un LSI de 80% lors de la première session d'évaluation, alors que quatre sujets y parvenaient lors de la seconde session d'évaluation. Deux d'entre eux atteignaient le seuil de 90%. Les résultats globaux des tests en fonction du LSI sont détaillés dans la Figure 1.

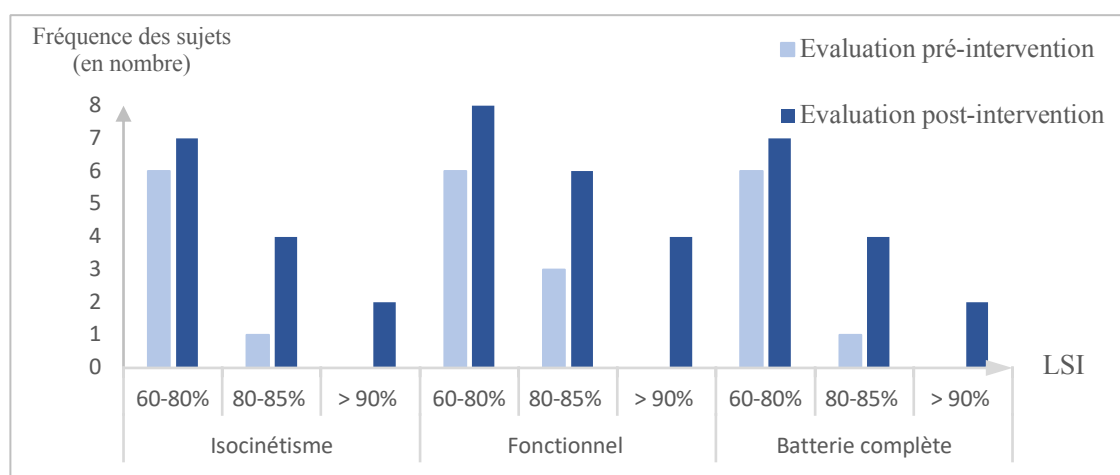


Figure 1 : comparaison pré/post-intervention de l'indice de symétrie des membres (LSI) dans les différents tests : isocinétisme (force, puissance, résistance excentrique), fonctionnel (single, triple, crossover, side hop test, Vertical Drop Jump) et de la batterie complète de tests

La corrélation entre le délai post-opératoire et la réussite de la batterie de tests ne s'est pas avérée significative ($r(8) = .406, p = .318$). Lorsque nous nous intéressons à la corrélation des tests de manière isolée, seule une corrélation significative est retrouvée entre le délai post-opératoire et le single hop test ($r(8) = .822, p = .023$).

Les corrélations entre les couples musculaires et les performances fonctionnelles sont détaillées dans le tableau 6. Le couple extenseur du genou de la jambe opérée en concentrique à 60°/s est corrélée positivement aux performances lors du Triple Hop Test ($r(8) = .747, p = .033$) et du Side Hop test ($r(8) = .741, p = .035$) alors qu'à 240°/s il est corrélée positivement aux performances sur le Triple Hop Test ($r(8) = .903, p = .002$), sur le Crossover Hop Test ($r(8) = .827, p = .011$) et sur le Side Hop Test ($r(8) = .727, p = .041$).

	Q – CONC 60°/s	Q – CONC 240°/s	Q – EXC 30°/s	IJ – CONC 60°/s	IJ – CONC 240°/s	IJ – EXC 30°/s
Single Hop Test	- 0.114 (p= 0.789)	0.044 (p= 0.917)	0.108 (p=0.799)	-0.301 (p= 0.469)	-0.290 (p= 0.486)	-0.039 (p=0.928)
Triple Hop Test	0.747* (p= 0.033)	0.903* (p= 0.002)	0.633 (p= 0.073)	0.533 (p= 0.174)	0.563 (p= 0.147)	0.615 (p= 0.105)
Crossover Hop Test	0.655 (p= 0.078)	0.827* (p= 0.011)	0.554 (p= 0.154)	0.431 (p= 0.286)	0.461 (p= 0.251)	0.475 (p= 0.134)
Side Hop Test	.741* (p= 0.035)	0.727* (p= 0.041)	0.542 (p= 0.165)	0.577 (p= 0.135)	0.552 (p= 0.156)	0.638 (p= 0.089)
Vertical Drop Jump						
TCS	-0.311 (p= 0.453)	-0.335 (p= 0.417)	-0.071 (p= 0.867)	-0.024 (p= 0.955)	-0.119 (p= 0.779)	-0.405 (p= 0.320)
Hauteur	0.448 (p= 0.265)	0.664 (p= 0.072)	0.236 (p= 0.574)	0.258 (p= 0.538)	0.305 (p= 0.463)	0.136 (p= 0.748)

Tableau 6 : corrélations entre les performances musculaires et fonctionnelles de la jambe opérée

*Abréviations : Q : extenseurs du genou (quadriceps) ; IJ : fléchisseurs du genou (ischio-jambiers) ; CONC = concentrique ; EXC = excentrique ; * : corrélation significative à un seuil fixé à 0,05.*

6 Discussion

6.1 Synthèse des résultats

En synthèse, les résultats de ce travail montrent qu'un protocole de cinq semaines d'entraînement au contrôle neuromusculaire à la suite d'une reconstruction du LCA permet d'améliorer les performances musculaires et fonctionnelles, principalement au niveau de la jambe opérée.

6.1.1 Efficacité sur la force musculaire

A la suite du protocole, nous avons retrouvé des améliorations au niveau des couples de force uniquement au niveau du membre inférieur opéré. Pour les extenseurs, seules les performances concentriques ont progressé. Cela peut être expliqué par le fait qu'après une reconstruction du LCA,

la contraction excentrique est plus difficile à exécuter pour le sportif car elle nécessite une grande habileté et un meilleur contrôle moteur que la contraction concentrique. Bien que l'entraînement excentrique à 80% de la charge maximale provoque plus d'adaptations que l'entraînement concentrique maximal et induit une augmentation du couple de force plus marqué, le gain en force excentrique semble être plus long à apparaître alors que les gains concentriques apparaissent dès le début d'un programme et se plafonnent très rapidement (Haribabu et al., 2014). L'association du renforcement concentrique et excentrique à un travail fonctionnel semble améliorer les résultats fonctionnels sur le Single hop test et Vertical Drop Jump. Cependant, dans ce travail, nous ne retrouvons pas de corrélations entre le gain musculaire et les gains fonctionnels. Les progressions présentes pour le couple de force extenseur et fléchisseurs à des vitesses rapides peuvent être aussi expliquées par le fait que les gains sont toujours plus importants à la vitesse utilisée lors de l'entraînement.

Quant aux fléchisseurs, nous avons recensé une amélioration de la force, de la puissance et de la résistance dans les trois modalités d'évaluation. Ces résultats laissent supposer que dans notre travail les fléchisseurs récupèrent plus rapidement que les extenseurs, d'autant plus que six sujets ont bénéficié d'une greffe issue des ischio-jambiers. Pourtant, dans la littérature, la récupération musculaire des fléchisseurs est plus lente lors de prélèvements d'un greffon postérieur (Dujardin et al., 2015).

La symétrie du couple maximal des extenseurs du genou doit être considéré pour le retour au sport puisqu'elle réduit considérablement le taux de réintervention (Grindem et al., 2016). En outre, la faiblesse du quadriceps est considérée comme un facteur de risque de développement de l'arthrose du genou (Palmieri-Smith & Lepley, 2015). En se basant sur les recommandations publiées concernant le renforcement musculaire après une opération du LCA, l'entraînement en hypertrophie et en chaîne ouverte permettrait de restaurer la symétrie du couple extenseur du genou chez 100% (38) des footballeurs de l'étude de Welling et al. (2019). Bien que nous ayons appliqué ce protocole dans notre travail, nos résultats ne se rejoignent pas puisque seuls 38% (3) des sujets y parviennent. Cette réussite se situe entre celle recensée par Palmieri-Smith & Lepley (2015) qui avaient constaté que 20% des sujets avaient retrouvé une force musculaire suffisante sept mois après la reconstruction, et celle développée par Welling et al., (2018) qui estimaient à 47% le taux de patients n'ayant pas réussi le critère de force du quadriceps lors d'une évaluation à neuf mois post-opératoire. Cela peut signifier que même un an après l'opération, certains sportifs ne sont pas capables de retourner sur le terrain de manière sécurisée. La différence entre nos résultats et ceux présents dans la littérature peut être expliquée par les différents protocoles de renforcement mis en place, leur durée (6 à 12 semaines) la fréquence des entraînements (deux à trois par semaine), le niveau des participants avant l'opération (amateurs à professionnels) ainsi que le niveau de force initial des participants.

6.1.2 Efficacité sur les performances fonctionnelles

L'entraînement au contrôle neuromusculaire a permis l'amélioration des valeurs du Crossover Hop Test, Side Hop Test et du Vertical Drop Jump. Ces résultats rejoignent partiellement ceux de Meierbachtol et al., qui obtenaient une amélioration des performances sur les Single, Triple et Crossover Hop Tests (Meierbachtol et al., 2017). Le temps de contact a été amélioré de manière significative sur chacun des membres inférieurs, lors du Vertical Drop Jump comme le soulignent Barendrecht et al. (2011), mais la hauteur n'a été augmentée que sur la jambe opérée. Ces résultats rejoignent également en partie ceux de Myer et al. (2005), qui démontrent une amélioration de la hauteur du VDJ. Néanmoins, ces auteurs évoquent une amélioration plus rapide de la hauteur que du temps de contact au sol, ce que nous ne retrouvons pas dans notre travail, après cinq semaines d'entraînement du contrôle neuromusculaire.

Ces résultats peuvent être expliqués par la courte durée du programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire. En effet, la plupart des études concernant l'effet de ce type de programme se déroulent durant six semaines minimums (Barendrecht et al., 2011 ; Nagelli et al., 2018 ; Meierbachtol et al., 2017). En raison des contraintes temporelles auxquelles nous étions confrontés nous n'avons pu mettre en place cette durée de travail, mais il serait intéressant de voir si des résultats comparables seraient obtenus avec une durée plus importante de l'intervention.

6.1.3 Réussite de la batterie complètes de tests

Bien que l'entraînement au contrôle neuromusculaire ait permis d'améliorer la symétrie des deux membres inférieurs, seuls trois participants (38%) franchissent le seuil acceptable de 90% de symétrie, et aucun d'entre eux n'atteint le seuil recommandé de 100% par Thomeé et al. (2012), 10,1 \pm 4,9 mois après une reconstruction du LCA. Ces résultats sont supérieurs à ceux développés par Welling et al. (2018), qui démontrent qu'à 9 mois, seuls 11,3 % des patients de l'étude actuelle ont réussi les critères de retour au sport.

Les rares corrélations constatées entre les performances musculaires et fonctionnelles sont en adéquation avec les dernières études à ce sujet. Herrington et al. (2018), ont évalué l'association entre le couple extenseur et la performance fonctionnelle après reconstruction du LCA chez quinze joueurs de football professionnels au moment de leur retour au sport et ont révélé que plus de 80 % des joueurs n'ont pas réussi à dépasser la symétrie des membres ≥ 90 % pour les tests de force, bien que 75% des sujets de la cohorte aient réussi les critères de ≥ 90 % pour les tests de saut. Nos résultats rejoignent aussi ceux de Barfod et al. (2019), qui évoquent que la récupération de la distance de saut n'a pas été associée au couple extenseur du genou, où seulement 39,1 % (18/46) des athlètes, qui ont récupéré une distance de saut satisfaisante, ont retrouvé une force satisfaisante des extenseurs du genou à six mois, et 51,6 % (32/62) à 12 mois de l'intervention chirurgicale. Welling et al. (2018),

révèlent que les améliorations les plus importantes ont été observées dans les trois tests de saut (single, triple, crossover) tandis que la force des quadriceps a révélé des déficits persistants. Cela démontre que la force musculaire est plus tardive à récupérer que les performances fonctionnelles.

Nous avons interrogé la corrélation entre le délai post-opératoire et l'indice de symétrie de la batterie complète de tests afin d'observer si les sujets se trouvant à une distance plus grande de leur opération, réussissaient mieux la batterie de tests proposée. Nous ne retrouvons pas de corrélation entre ces deux variables. Comme le souligne Aljowair & Herrington (2018), nous pouvons percevoir une corrélation faible à moyenne entre les tests fonctionnels et les mesures isocinétiques, qui dépend du temps écoulé après l'intervention chirurgicale, ainsi que de la méthodologie et de la population. Nos résultats se rapprochent des valeurs de Myer et al. (2012), qui ne trouvaient pas de corrélation entre la symétrie des membres sur un Vertical Drop Jump et la durée écoulée depuis l'opération. Bien que l'échantillon de notre travail soit très réduit, cela confirme la tendance selon laquelle la décision de retour au sport doit être basée sur des critères objectifs et non sur un délai, puisqu'il n'est pas directement corrélé aux capacités du patient. Pourtant, Barber-Westin & Noyes (2011), ont démontré que seules 13% des études utilisaient des critères objectifs pour déterminer le retour au sport.

6.2 Variabilités interindividuelles

La progression de chaque participant n'était que rarement corrélée à ses performances initiales, aussi bien sur les tests musculaires que sur les évaluations fonctionnelles. Cela peut signifier que chaque participant évolue de manière totalement indépendante et que la valeur initiale n'est pas révélatrice des progrès futurs. Compte tenu de la grande variabilité entre les sujets après une reconstruction du LCA, les protocoles de rééducation doivent être basés sur des critères objectifs et conçus individuellement, permettant ainsi une progression individuelle (Thomé et al., 2012b ; Rambaud et al., 2018). Afin d'évaluer l'efficacité d'un protocole, les exercices étaient standardisés et ne permettaient pas cette individualisation. Il existe des différences individuelles en termes d'apprentissage neuromoteur après une reconstruction du LCA, celles-ci soulignent l'importance de passer d'une rééducation basée sur le temps à une rééducation basée sur des objectifs avec des cibles neuromusculaires et des critères permettant de gérer le processus de rééducation (van Melick et al., 2016). Tel qu'évoqué précédemment, selon les déficits recensés lors de la première phase d'évaluation, certains sujets auraient pu bénéficier d'un programme ciblé plus particulièrement sur l'aspect musculaire ou fonctionnel selon leur niveau initial afin d'optimiser leur prise en charge.

6.3 Limites des tests

Bien que certains participants aient obtenu des scores leur permettant de se rapprocher d'un retour au sport sécurisé, les données actuelles suggèrent que la restauration de la symétrie dans la distance de saut ne garantit pas que la cinématique et la cinétique du genou sont restaurées après une reconstruction du LCA (Gokeler et al., 2017 ; Barfod et al., 2019). Les tests fonctionnels existants sont

peu écologiques empêchant ainsi potentiellement l'élucidation de déficits de performances fonctionnelles cliniquement significatifs (Dingenen & Gokeler, 2017). La spécificité de ces mouvements par rapport au risque de lésion du LCA ne représentant pas de manière adéquate celles qui sont effectuées dans un environnement sportif de compétition (Fox et al., 2016). En effet, les dernières recommandations pour les batteries de tests incluent une analyse de la réception de l'athlète (DiFabio et al., 2018). Ainsi se pose la question de mettre en place d'autres modalités d'évaluations, ou de proposer un test plus « proche » des conditions réellement vécues durant l'activité. Durant ce stage, du temps a également été dédié à cette question, pour mettre en place un « pilote » de test de saut expérimental qui reproduirait les contraintes présentes sur le terrain d'un sport de pivot-contact et d'évaluer la cinématique lors de ce saut, plutôt que lors d'un Vertical Drop Jump, comme souvent pratiqué.

6.3.1 Mise en place d'un nouveau test

Pour cela, nous avons recruté des sujets sains et des sujets blessés afin de pouvoir étudier la fiabilité d'un test de saut expérimental. Trente-quatre sujets volontaires pris en soins au centre de kinésithérapie « l'Ekipe » ont participé à cette partie du travail. Les recherches sur l'évaluation de la biomécanique utilisent généralement des cohortes féminines car il s'agit de la population qui présente le plus de risques de blessure et le moins bon contrôle neuromusculaire (van Melick et al., 2016 ; Lepley & Kuenze, 2018). Nous avons fait le choix d'inclure des hommes et des femmes, sans proportion particulière, afin que les résultats de ce test justifient son utilisation pour tous. De même, nous n'avons pas restreint notre étude à un sport de pivot en particulier dans le même objectif.

Pour le groupe de sujets sains, ils devaient être âgés de moins de trente-cinq ans et devaient pratiquer un sport de pivot. Les critères de non inclusion étaient les suivants : antécédents de blessure au LCA (opérée ou non), antécédents de chirurgie du membre inférieur ou du tronc, blessures au membre inférieur ou au tronc depuis au moins 12 mois. Le groupe était composé 15 sujets (3 femmes âgées de $24,7 \pm 2,2$ ans, taille $168,7 \pm 0,9$ cm, poids $62,7 \pm 1,5$ kg ; 12 hommes âgés de $27,5 \pm 3,75$ ans, taille $175,9 \pm 3,9$ cm, poids $70 \pm 5,7$ kg) (cf. Annexe V-Tableau II).

Les critères d'inclusion des sujets opérés étaient les mêmes hormis le fait qu'ils devaient avoir été opérés d'une chirurgie reconstructrice du LCA datant d'au moins 6 mois le jour des premiers tests. Les critères de non inclusion étaient les mêmes que pour le groupe de sujets sains hormis l'opération du LCA. Le groupe était composé de 19 sujets (6 femmes âgées de $20,8 \pm 2,8$ ans, taille $168,7 \pm 4,6$ cm, poids $65,2 \pm 4,9$ kg ; 13 hommes âgés de $26,3 \pm 4,4$ ans, taille $178,6 \pm 3,3$ cm, poids $77,2 \pm 6,6$ kg). Les sujets étaient opérés depuis $10,1 \pm 4,9$ mois (cf. Annexe V-Tableau I).

Pour ce test de saut, les participants ont reçu des instructions verbales standardisées et la tâche a été démontrée pour chaque jambe en raison de la complexité de celle-ci. Le test a débuté avec la jambe

dominante (sujets sains) ou la jambe non opérée (sujets opérés). Les participants ont disposé de trois sauts d'échauffement et de deux sauts mesurés.

Les manœuvres de changement de direction sont fréquentes et constituent un facteur déterminant des performances dans les sports de pivot. Ces manœuvres sont associées à des lésions du LCA, c'est pourquoi nous avons cherché à reproduire l'une d'entre elles lors d'un test expérimental. Le sujet a commencé le test en appui unipodal sur la jambe non testée sur une boîte de 40 centimètres de hauteur. L'objectif était de sauter de la boîte et d'atterrir sur la jambe testée après un repère A, placé à 50% de sa taille. Dès cette réception, il devait enchaîner sans temps d'arrêt avec un changement de direction avec rotation à 90° du côté opposé à la jambe testée pour se réceptionner en maîtrisant sa flexion de genou jusqu'à atteindre les 90° de flexion de genou, si possible (cf. Annexe VI).

Les deux sauts d'évaluation étaient filmés au ralenti à l'aide de deux caméras type « iPhone »[®] placées respectivement à 3m de la réception A du sujet et à 1m du sol (80% des distances évoquées par Dingenen et al. (2019), en raison d'un défaut d'espace pour reproduire les distances de leur étude). Une première était placée face au point A pour évaluer la biomécanique dans le plan frontal et une seconde était placée perpendiculairement au point A pour évaluer la biomécanique dans le plan sagittal. Seul l'appui A était analysé afin d'évaluer la biomécanique de la jambe initiant le changement de direction. La distance entre la réception A et la réception B était mesurée afin d'établir un indice de symétrie entre les deux jambes. La deuxième réception permettait de valider le test : elle devait être contrôlée (réception en une fois) et amortie (l'athlète devait être capable d'amortir sa réception en réalisant un squat unipodal).

L'essai n'était pas validé si le sujet ne posait pas l'appui A au-delà de la ligne fixée à 50% de sa taille, chutait ou ne réalisait pas la tâche de manière fluide, n'exécutait pas de changement de direction à 90°, n'était pas capable de stabiliser la réception B ou n'était pas apte à enchaîner le squat après la réception B (Dingenen et al., 2014). Aucune consigne sur la technique n'a été donnée hormis les consignes de distance maximale entre les points A et B et de temps de contact au sol minimal pour l'appui A. Un temps de repos de 30 secondes a été administré entre chaque essai. L'évaluateur pouvait redemander des sauts supplémentaires s'il déterminait que les sauts étaient invalides.

Une des consignes du change of direction test était d'enchaîner un changement de direction maximum (le plus loin possible) après la réception A. Cette consigne permet de réaliser un saut avec un objectif de distance qui permet d'éviter que l'athlète se concentre sur la manière de se réceptionner afin de retrouver les mécanismes rencontrés sur le terrain (van Melick et al., 2016). De plus, la distance mesurée peut être utile dans le calcul de l'indice de symétrie fonctionnel afin d'identifier des différences entre les deux jambes. Son utilisation peut être intéressante pour le suivi et le retour au sport après

blessure afin d'évaluer les différences jambe saine versus jambe blessée et fournir une évaluation quantitative complémentaire à l'analyse qualitative vidéo (Rambaud, 2015).

6.3.2 Reproductibilité

Cette évaluation était réalisée par deux examinateurs indépendants. Chacun mesurait la distance du marquage externe de l'encoche indiquée par un repère réalisé avec une bande de tape (réception A) jusqu'au talon lors de la réception B. Les examinateurs indiquaient leurs mesures dans leur fichier informatique de recueil de données et ne communiquaient pas mutuellement. La deuxième valeur quantitative, le temps de contact au sol lors de l'appui A, s'obtenait grâce au traitement ultérieur de la vidéo sur l'application MyJump2 (version 5.1 by Dr. Carlos Balsalobre-Fernandez). Chaque examinateur traitait la vidéo réalisée dans le plan frontal. Le temps de contact au sol pendant la phase de changement de direction est un critère de performance utilisé dans la littérature scientifique. La réduction du temps de contact au sol signifie que les athlètes passent moins de temps à se propulser dans la nouvelle direction, ce qui se traduit par une performance de changement de direction plus rapide (Fox, 2018).

L'évaluation qualitative se déroulait, elle aussi, ultérieurement grâce à l'analyse des vidéos via le score SL-LESS. Les évaluateurs pouvaient visionner les vidéos autant de fois qu'ils le souhaitaient. Les résultats obtenus par les deux évaluateurs sont comparés entre eux afin d'établir la fiabilité inter-évaluateur du test. Les deux vidéos de chaque essai étaient traitées à minimum de dix jours d'intervalle par un seul des opérateurs afin que la mémoire de celui-ci ne puisse être un biais, puis les résultats étaient comparés entre eux afin d'établir la fiabilité intra-évaluateur du test.

Les valeurs de corrélation intra-classe ont été définies comme médiocres ($CCI < 0,50$), modérées ($0,50 < CCI < 0,74$), bonnes ($0,75 < CCI < 0,89$) ou excellentes ($0,90 < CCI < 1,00$) (Portney et Watkins, 2000). L'erreur standard de mesure (ESM) est définie comme la déviation de la distribution des valeurs selon une loi statistique. Elle a été déterminée en fonction de l'écart-type (SD) et du coefficient de corrélation intra-classe (CCI), à l'aide de la formule suivante : $ESM = SD * \sqrt{1 - CCI}$ (Weir, 2005). Le minimum de changement détectable (MCD) fait référence à la quantité minimale de changement en dehors de l'erreur, qui reflète le changement réel. Il a été estimé grâce à l'erreur standard de mesure, avec l'équation suivante : $MCD = ESM * 1,96 * \sqrt{2}$.

Les résultats obtenus sont présentés en Annexe VII. Ceux-ci montrent que la fiabilité entre les sessions de la mesure de la distance est excellente aussi bien pour une population saine que pour une population opérée du LCA (cf. Annexe VII-Tableau I). L'ESM était de 1,74cm et le MCD était de 3,10 cm au sein d'une population saine. Dans le groupe opéré, ces valeurs étaient de 1,81cm et de 3,19 cm pour l'ESM et le MDC respectivement. La fiabilité entre les examinateurs était excellente, elle aussi, pour ces deux populations (cf. Tableau Annexe VII-Tableau I). L'ESM était de 1,46cm et

le MCD de 3,19cm au sein d'une population saine. Au sein d'une population opérée, ces valeurs étaient de 0,70cm et de 3,15cm respectivement.

En ce qui concerne la fiabilité intra-opérateur de la mesure du temps de contact au sol, elle était excellente pour une population saine et une population reconstruite du LCA (cf. Annexe VII-Tableau II). L'ESM était de 8,08ms et le MCD entre 22,37ms pour le groupe sain. Au sein d'une population opérée, ces valeurs étaient respectivement de 8,19ms et de 219,03ms, pour l'ESM et le MCD.

La fiabilité inter-opérateur de cette mesure était excellente elle aussi pour les deux populations (cf. Annexe VII-Tableau II). L'ESM était de 5,56ms et le MCD de 37ms au sein d'une population saine. Pour le groupe opéré, ces valeurs étaient de 18,56ms et de 218,48ms respectivement. Nous retrouvons des valeurs relativement élevées concernant le MCD dans le groupe opéré.

Lors de l'analyse de la fiabilité de l'évaluation qualitative grâce au SL-LESS score, nous obtenons une fiabilité entre les sessions qualifiée de bonne aussi bien au sein d'une population saine que d'une population opérée du genou (cf. Annexe VII-Tableau III). L'ESM était de 0,54 et le MCD était de 0,31 au sein d'une population saine. Au sein d'une population blessée, ces valeurs étaient de 0,57 et de 0,31 respectivement.

La fiabilité entre les examinateurs de cette variable est quant à elle excellente dans les deux groupes (cf. Annexe VII-Tableau III). L'ESM était de 0,39 et le MCD était de 0,29 au sein d'une population saine. Au sein d'une population blessée, ces valeurs étaient de 0,48 et de 0,30 respectivement.

6.4 Limites de l'étude

Le nombre restreint de sujets et l'absence de groupe contrôle limitent la possibilité de tirer des conclusions définitives. De plus, nous avons évalué les effets de notre protocole à plus de six mois de l'intervention chirurgicale, ce qui peut biaiser nos résultats puisque ce type d'intervention peut être conduite plus tôt (Liu-Ambrose et al., 2003). A ce jour, aucun test n'a démontré la validité prédictive du retour au sport de manière sécurisée. Nous avons donc cherché à mettre en place un test de saut qui reproduisait les contraintes présentes sur le terrain d'un sport de pivot lors d'un changement de direction.

Les résultats du test expérimental, aussi bien chez sujets sains que chez sujets opérés, ne permettent pas de le définir comme un test discriminatif sur des valeurs quantitatives, puisque 93% de sujets sains obtiennent un indice de symétrie de 90% contre 89% de sujets opérés. Il est intéressant lorsque nous nous intéressons à des critères qualitatifs. En effet, il permet de distinguer des patterns à risque entre les deux populations. La flexion de genou et le déplacement du tronc vers l'avant étaient déficitaires chez 21% des sujets opérés contre 7% des sujets sains. Aucun des sujets sains ne possédait de déficit dans le déplacement de la flexion de genou contre 16% des sujets opérés. Le valgus de genou au contact initial était présent chez 37% des sujets sains et 40% des sujets opérés,

mais le déplacement en valgus de genou était présent chez 44% des sujets sains contre 74% des sujets opérés. Cela permet donc de mettre en évidence les défauts cinématiques après reconstruction du LCA.

Bien que ce test tente de détecter le risque de blessure grâce à la reproduction de mouvements présents sur le terrain, une tâche de dépistage doit être capable d'identifier le risque de blessures sur la base de mesures. De plus, le risque de blessures en match est vingt fois plus élevé qu'à l'entraînement. La tâche du mouvement doit donc être proche de la situation réelle de jeu afin de révéler le mauvais contrôle des genoux des athlètes. En ce sens, de nouveaux tests pourraient être envisagés tel que présentés dans ce travail. Une tâche de mouvement plus difficile et plus intense, se rapprochant de celle d'un match avec une distraction visuelle et une inattention, comme une tâche imprévue d'attraper une balle pourrait être envisagée afin de provoquer un plus grand degré de mauvais contrôle des genoux et donc de déterminer un niveau de sécurité de retour à l'activité sportive encore plus grand (Mok & Leow, 2016).

Enfin, l'aspect psychologique et la confiance des athlètes, non évalués dans ce travail, sont également à considérer. La peur de se blesser de nouveau est une des craintes les plus souvent déclarées par les athlètes lors de la reprise du sport. Alors qu'une meilleure préparation psychologique, une plus grande motivation et une évaluation subjective plus positive de la fonction du genou favorisaient un retour au niveau antérieur à la blessure (Dingenen & Gokeler, 2017). Des échelles, telles que l'ACL-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) ont été développées pour évaluer la préparation psychologique de l'athlète avant son retour au sport. Cela permet d'évaluer les émotions, la confiance et l'évaluation des risques associés au retour au sport après une blessure au ligament croisé antérieur et il a été prouvé qu'elle permet de distinguer les athlètes qui ont repris le sport après une blessure au ligament croisé antérieur de ceux qui ne l'ont pas fait (Arder et al., 2013)

7 Conclusion

Ce travail a permis de montrer que le protocole d'entraînement au contrôle neuromusculaire de cinq semaines a permis une amélioration de la force musculaire, mais aussi des performances fonctionnelles des participants ayant été blessés, puis opérés du LCA. Les principales progressions apparaissent au niveau du membre opérée. À $10,1 \pm 4,9$ mois après une reconstruction du ligament croisé antérieur, 38% des sujets remplissent des critères de symétrie musculaire et fonctionnelle de 90%. Il est fortement suggéré de décider de la reprise sportive sur des critères objectifs plutôt que sur des critères temporels.

Ce travail, émet également une réflexion vers le développement d'un nouveau test de saut, reproduisant les contraintes présentes sur le terrain et se basant sur des critères quantitatifs et qualitatifs, s'est avéré reproductible. Nous pensons qu'il s'agit d'une piste intéressante à développer afin de permettre de prédire un retour au sport sécurisé pour les athlètes pratiquant un sport de pivot.

Références

Articles de revues

- Abrams, G. D., Harris, J. D., Gupta, A. K., McCormick, F. M., Bush-Joseph, C. A., Verma, N. N., Cole, B. J., & Bach, B. R. (2014). Functional Performance Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2(1), 232596711351830.
- Alentorn-Geli, E., Myer, G. D., Silvers, H. J., Samitier, G., Romero, D., Lázaro-Haro, C., & Cugat, R. (2009a). Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1 : Mechanisms of injury and underlying risk factors. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 17(7), 705-729.
- Alentorn-Geli, E., Myer, G. D., Silvers, H. J., Samitier, G., Romero, D., Lázaro-Haro, C., & Cugat, R. (2009b). Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 2 : A review of prevention programs aimed to modify risk factors and to reduce injury rates. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 17(8), 859-879. <https://doi.org/10.1007/s00167-009-0823-z>
- Aljowair, F. F., & Herrington, L. C. (2018). The Relationship between Hop Performance and Lower Extremities Muscle Strength. *International Journal Of Medical Science And Clinical Invention*, 5(3), 3714-3720.
- Ardern, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., Gojanovic, B., Griffin, S., Khan, K. M., Moksnes, H., Mutch, S. A., Phillips, N., Reurink, G., Sadler, R., Grävare Silbernagel, K., Thorborg, K., Wangensteen, A., Wilk, K. E., & Bizzini, M. (2016). 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British Journal of Sports Medicine*, 50(14), 853-864.
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2014). Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery : An updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *British Journal of Sports Medicine*, 48(21), 1543-1552.
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., Whitehead, T. S., & Webster, K. E. (2013). Psychological Responses Matter in Returning to Preinjury Level of Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(7), 1549-1558.
- Barber-Westin, S. D., & Noyes, F. R. (2011). Factors Used to Determine Return to Unrestricted Sports Activities After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 27(12), 1697-1705.
- Barendrecht, M., Lezeman, H. C. A., Duysens, J., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2011). Neuromuscular Training Improves Knee Kinematics, in Particular in Valgus Aligned Adolescent Team Handball Players of Both Sexes: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(3), 575-584.
- Barfod, K. W., Feller, J. A., Hartwig, T., Devitt, B. M., & Webster, K. E. (2019). Knee extensor strength and hop test performance following anterior cruciate ligament reconstruction. *The Knee*, 26(1), 149-154.

- Beynon, B. D., Johnson, R. J., Abate, J. A., Fleming, B. C., & Nichols, C. E. (2005). Treatment of Anterior Cruciate Ligament Injuries, Part I. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(10), 1579-1602.
- Bourne, M. N., Webster, K. E., & Hewett, T. E. (2019). Is Fatigue a Risk Factor for Anterior Cruciate Ligament Rupture? *Sports Medicine*, 49(11), 1629-1635.
- Burgi, C. R., Peters, S., Ardern, C. L., Magill, J. R., Gomez, C. D., Sylvain, J., & Reiman, M. P. (2019). Which criteria are used to clear patients to return to sport after primary ACL reconstruction? A scoping review. *British Journal of Sports Medicine*, 53(18), 1154-1161.
- Chappell, J. D., Creighton, R. A., Giuliani, C., Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Kinematics and Electromyography of Landing Preparation in Vertical Stop-Jump : Risks for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(2), 235-241.
- Croisier, J.-L., Ganteaume, S., Binet, J., Genty, M., & Ferret, J.-M. (2008). Strength Imbalances and Prevention of Hamstring Injury in Professional Soccer Players : A Prospective Study. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(8), 1469-1475.
- Cvjetkovic, D., Bijeljic, S., Palija, S., Talic, G., Radulovic, T., Kosanovic, M., & Manojlovic, S. (2015). Isokinetic Testing in Evaluation Rehabilitation Outcome After ACL Reconstruction. *Medical Archives*, 69(1), 21.
- DiFabio, M., Slater, L. V., Norte, G., Goetschius, J., Hart, J. M., & Hertel, J. (2018). Relationships of Functional Tests Following ACL Reconstruction : Exploratory Factor Analyses of the Lower Extremity Assessment Protocol. *Journal of Sport Rehabilitation*, 27(2), 144-150.
- Dingenen, B., & Gokeler, A. (2017). Optimization of the Return-to-Sport Paradigm After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : A Critical Step Back to Move Forward. *Sports Medicine*, 47(8), 1487-1500.
- Dingenen, B., Malfait, B., Vanrenterghem, J., Verschueren, S. M. P., & Staes, F. F. (2014). The reliability and validity of the measurement of lateral trunk motion in two-dimensional video analysis during unipodal functional screening tests in elite female athletes. *Physical Therapy in Sport*, 15(2), 117-123.
- Dingenen, B., Truijen, J., Bellemans, J., & Gokeler, A. (2019). Test-retest reliability and discriminative ability of forward, medial and rotational single-leg hop tests. *The Knee*, 26(5), 978-987.
- Dujardin, D., Fontanin, N., Geffrier, A., Morel, N., Mensa, C., & Ohl, X. (2015). Récupération musculaire après reconstruction du ligament croisé antérieur par ligamentoplastie semi-tendineux 4 brins : Prélèvements postérieurs versus antérieurs. Étude préliminaire. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 101(5), 346-349.
- Fox, A. S. (2018). Change-of-Direction Biomechanics: Is What's Best for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Also Best for Performance? *Sports Medicine*, 48(8), 1799-1807.
- Fox, A. S., Bonacci, J., McLean, S. G., Spittle, M., & Saunders, N. (2016). A Systematic Evaluation of Field-Based Screening Methods for the Assessment of Anterior Cruciate Ligament (ACL) Injury Risk. *Sports Medicine*, 46(5), 715-735.

- Gokeler, A., Welling, W., Benjaminse, A., Lemmink, K., Seil, R., & Zaffagnini, S. (2017). A critical analysis of limb symmetry indices of hop tests in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: A case control study. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 103(6), 947-951.
- Gokeler, Alli, Neuhaus, D., Benjaminse, A., Grooms, D. R., & Baumeister, J. (2019). Principles of Motor Learning to Support Neuroplasticity After ACL Injury: Implications for Optimizing Performance and Reducing Risk of Second ACL Injury. *Sports Medicine*, 49(6), 853-865.
- Gokeler, Alli, Welling, W., Zaffagnini, S., Seil, R., & Padua, D. (2017). Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 25(1), 192-199.
- Grindem, H., Snyder-Mackler, L., Moksnes, H., Engebretsen, L., & Risberg, M. A. (2016). Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: The Delaware-Oslo ACL cohort study. *British Journal of Sports Medicine*, 50(13), 804-808.
- Gustavsson, A., Neeter, C., Thomeé, P., Grävare Silbernagel, K., Augustsson, J., Thomeé, 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 Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 14(8), 778-788.
- Haribabu, G., Sreekar Kumar Reddy, R., Kiran Kumar, A., Krishna Murthy, M. O., & Sushma Anand, J. (2014). Effectiveness of Concentric and Eccentric Resistance Training of Quadriceps and Hamstrings on Muscle Strength, Rom, and Pain in ACL Reconstructed Subjects. *International Journal of Physiotherapy*, 1(4), 209.
- Herrington, L., Ghulam, H., & Comfort, P. (2018). Quadriceps Strength and Functional Performance After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Professional Soccer players at Time of Return to Sport: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1.
- Hewett, T. E., Ford, K. R., Xu, Y. Y., Khoury, J., & Myer, G. D. (2017). Effectiveness of Neuromuscular Training Based on the Neuromuscular Risk Profile. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(9), 2142-2147.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2006). Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: Part 1, Mechanisms and Risk Factors. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(2), 299-311.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., 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. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492-501.
- James, J., Ambegaonkar, J. P., Caswell, S. V., Onate, J., & Cortes, N. (2016). Analyses of Landing Mechanics in Division I Athletes Using the Landing Error Scoring System. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 8(2), 182-186.

- Kim, D., & Hong, J. (2011). Hamstring to quadriceps strength ratio and noncontact leg injuries: A prospective study during one season. *Isokinetics and Exercise Science*, 19(1), 1-6.
- Kotsifaki, A., Korakakis, V., Whiteley, R., Van Rossom, S., & Jonkers, I. (2020). Measuring only hop distance during single leg hop testing is insufficient to detect deficits in knee function after ACL reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 54(3), 139-153.
- Krosshaug, T., Steffen, K., Kristianslund, E., Nilstad, A., Mok, K.-M., Myklebust, G., Andersen, T. E., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2016). The Vertical Drop Jump Is a Poor Screening Test for ACL Injuries in Female Elite Soccer and Handball Players: A Prospective Cohort Study of 710 Athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 44(4), 874-883.
- Kyritsis, P., Bahr, R., Landreau, P., Miladi, R., & Witvrouw, E. (2016). Likelihood of ACL graft rupture: Not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *British Journal of Sports Medicine*, 50(15), 946-951.
- Lepley, A. S., & Kuenze, C. M. (2018). Hip and Knee Kinematics and Kinetics During Landing Tasks After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Athletic Training*, 53(2), 144-159.
- Liu-Ambrose, T., Taunton, J. E., MacIntyre, D., McConkey, P., & Khan, K. M. (2003). The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: A randomized clinical trial. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13(2), 115-123.
- Lyman, S., Koulouvaris, P., Sherman, S., Do, H., Mandl, L. A., & Marx, R. G. (2009). Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Trends, Readmissions, and Subsequent Knee Surgery. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*, 91(10), 2321-2328.
- Lynch, A. D., Logerstedt, D. S., Grindem, H., Eitzen, I., Hicks, G. E., Axe, M. J., Engebretsen, L., Risberg, M. A., & Snyder-Mackler, L. (2015). Consensus criteria for defining 'successful outcome' after ACL injury and reconstruction: A Delaware-Oslo ACL cohort investigation. *British Journal of Sports Medicine*, 49(5), 335-342.
- Maffiuletti, N. A., Bizzini, M., Desbrosses, K., Babault, N., & Munzinger, U. (2007). Reliability of knee extension and flexion measurements using the Con-Trex isokinetic dynamometer. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 27(6), 346-353.
- Malfait, B., Dingenen, B., Smeets, A., Staes, F., Pataky, T., Robinson, M. A., Vanrenterghem, J., & Verschueren, S. (2016). Knee and Hip Joint Kinematics Predict Quadriceps and Hamstrings Neuromuscular Activation Patterns in Drop Jump Landings. *PLOS ONE*, 11(4), e0153737.
- Meierbachtol, A., Rohman, E., Paur, E., Bottoms, J., & Tompkins, M. (2017). Quantitative Improvements in Hop Test Scores After a 6-Week Neuromuscular Training Program. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 9(1), 22-29.

- Mok, K.-M., & Leow, R.-S. (2016). Measurement of movement patterns to enhance ACL injury prevention – A dead end? *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 5, 13-16.
- Munro, A., Herrington, L., & Carolan, M. (2012). Reliability of 2-Dimensional Video Assessment of Frontal-Plane Dynamic Knee Valgus During Common Athletic Screening Tasks. *Journal of Sport Rehabilitation*, 21(1), 7-11.
- Myer, G. D., Ford, K. R., Palumbo, J. P., & Hewett, T. E. (2005). Neuromuscular Training Improves Performance and Lower-Extremity Biomechanics in Female Athletes. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 51.
- Myer, G. D., Martin, L., Ford, K. R., Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Heidt, R. S., Colosimo, A., & Hewett, T. E. (2012). No Association of Time From Surgery With Functional Deficits in Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : Evidence for Objective Return-to-Sport Criteria. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(10), 2256-2263.
- Nagelli, C. V., & Hewett, T. E. (2017). Should Return to Sport be Delayed Until 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? Biological and Functional Considerations. *Sports Medicine*, 47(2), 221-232.
- Nagelli, C., Wordeman, S., Di Stasi, S., Hoffman, J., Marulli, T., & Hewett, T. E. (2018). Biomechanical Deficits at the Hip in Athletes With ACL Reconstruction Are Ameliorated With Neuromuscular Training. *The American Journal of Sports Medicine*, 46(11), 2772-2779.
- Padua, D. A., DiStefano, L. J., Beutler, A. I., de la Motte, S. J., DiStefano, M. J., & Marshall, S. W. (2015). The Landing Error Scoring System as a Screening Tool for an Anterior Cruciate Ligament Injury–Prevention Program in Elite-Youth Soccer Athletes. *Journal of Athletic Training*, 50(6), 589-595.
- Palmieri-Smith, R. M., & Lepley, L. K. (2015). Quadriceps Strength Asymmetry After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Alters Knee Joint Biomechanics and Functional Performance at Time of Return to Activity. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(7), 1662-1669.
- Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., Huang, B., & Hewett, T. E. (2010). Biomechanical Measures during Landing and Postural Stability Predict Second Anterior Cruciate Ligament Injury after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(10), 1968-1978.
- Portney, L. G., & Watkins, M. P. (2000). Validity of measurements. *Foundations of clinical research: Applications to practice*, 2.
- Rambaud, A., Chazal, A., Edouard, P., & Moret, S. (2015). Place des tests fonctionnels dans l'évaluation de la force musculaire du membre inférieur : Utilisation des hop tests. 569, 37-40.
- Rambaud, A. J. M., Ardern, C. L., Thoreux, P., Regnaud, J.-P., & Edouard, P. (2018). Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction : A scoping review. *British Journal of Sports Medicine*, 52(22), 1437-1444.

- Rambaud, A. J. M., Semay, B., Samozino, P., Morin, J.-B., Testa, R., Philippot, R., Rossi, J., & Edouard, P. (2017). Criteria for Return to Sport after Anterior Cruciate Ligament reconstruction with lower reinjury risk (CR'STAL study) : Protocol for a prospective observational study in France. *BMJ Open*, 7(6), e015087.
- Rendos, N. K., Harriell, K., Qazi, S., Regis, R. C., Alipio, T. C., & Signorile, J. F. (2019). Variations in Verbal Encouragement Modify Isokinetic Performance: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(3), 708-716.
- Sevrez, V., & Bourdin, C. (2015). On the Role of Proprioception in Making Free Throws in Basketball. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 86(3), 274-280.
- Sigward, S. M., Cesar, G. M., & Havens, K. L. (2014). Predictors of Frontal Plane Knee Moments During Side-Step Cutting to 45 and 110 Degrees in Men and Women : Implications for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 1.
- Sigward, S. M., & Pollard, C. D. (2018). Proximal Risk Factors for ACL Injury : Role of the Hip Joint and Musculature. In F. R. Noyes & S. Barber-Westin (Éds.), *ACL Injuries in the Female Athlete* (p. 207-223). Springer Berlin Heidelberg.
- Thomeé, R., Kaplan, Y., Kvist, J., Myklebust, G., Risberg, M. A., Theisen, D., Tsepis, E., Werner, S., Wondrasch, B., & Witvrouw, E. (2011). Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 19(11), 1798-1805.
- Thomeé, R., Neeter, C., Gustavsson, A., Thomeé, P., Augustsson, J., Eriksson, B., & Karlsson, J. (2012a). Variability in leg muscle power and hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20(6), 1143-1151.
- Thomeé, R., Neeter, C., Gustavsson, A., Thomeé, P., Augustsson, J., Eriksson, B., & Karlsson, J. (2012b). Variability in leg muscle power and hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20(6), 1143-1151.
- Tran, A. A., Gatewood, C., Harris, A. H. S., Thompson, J. A., & Dragoo, J. L. (2016). The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 3(1), 13.
- Undheim, M. B., Cosgrave, C., King, E., Strike, S., Marshall, B., Falvey, É., & Franklyn-Miller, A. (2015). Isokinetic muscle strength and readiness to return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction : Is there an association? A systematic review and a protocol recommendation. *British Journal of Sports Medicine*, 49(20), 1305-1310.
- van Melick, N., van Cingel, R. E. H., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hulleger, W., & Nijhuis-van der Sanden, M. W. G. (2016). Evidence-based clinical practice update : Practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *British Journal of Sports Medicine*, 50(24), 1506-1515.

- Ward, S. H., Blackburn, J. T., Padua, D. A., Stanley, L. E., Harkey, M. S., Luc-Harkey, B. A., & Pietrosimone, B. (2018). Quadriceps Neuromuscular Function and Jump-Landing Sagittal-Plane Knee Biomechanics After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 53(2), 135-143.
- Welling, W., Benjaminse, A., Lemmink, K., Dingenen, B., & Gokeler, A. (2019). Progressive strength training restores quadriceps and hamstring muscle strength within 7 months after ACL reconstruction in amateur male soccer players. *Physical Therapy in Sport*, 40, 10-18.
- Welling, W., Benjaminse, A., Seil, R., Lemmink, K., Zaffagnini, S., & Gokeler, A. (2018). Low rates of patients meeting return to sport criteria 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective longitudinal study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(12), 3636-3644.
- Weir, J. P. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(1), 231-240.
- Wetters, N., Weber, A. E., Wuerz, T. H., Schub, D. L., & Mandelbaum, B. R. (2016). Mechanism of Injury and Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Operative Techniques in Sports Medicine*, 24(1), 2-6.
- Withrow, T. J., Huston, L. J., Wojtys, E. M., & Ashton-Miller, J. A. (2008). Effect of Varying Hamstring Tension on Anterior Cruciate Ligament Strain During in Vitro Impulsive Knee Flexion and Compression Loading: *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*, 90(4), 815-823.
- Wren, T. A. L., Mueske, N. M., Brophy, C. H., Pace, J. L., Katzel, M. J., Edison, B. R., Vandenberg, C. D., & Zaslow, T. L. (2018). Hop Distance Symmetry Does Not Indicate Normal Landing Biomechanics in Adolescent Athletes With Recent Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 48(8), 622-629.

Ouvrages

Kapandji, A. I. (2009). *Anatomie fonctionnelle : Membre inférieur* (6ème édition). Maloine.

Thèses et mémoires

O'Connor, M. L. (2015). The development of the Single-Leg Landing Error Scoring System (SL- LESS) for lower extremity movement screening (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee).

Table des annexes

Annexe I : formulaire de consentement éclairé

Annexe II : consignes standardisées pour le passage des tests fonctionnels de saut

Annexe III : Ateliers proposés pour le travail fonctionnel du programme d'entraînement du contrôle neuromusculaire

Annexe IV : Corrélations entre les performances initiales des sujets et leur progression après le programme d'entraînement du contrôle neuromusculaire

Annexe V : caractéristiques des participants (sains et blessés) au travail sur le test de saut expérimental (change of direction test)

Annexe VI : Représentation schématique du test de saut expérimental (change of direction test)

Annexe VII : reproductibilité du change of direction test



Formulaire de consentement éclairé



Titre de l'étude : intérêt d'un protocole d'entraînement au contrôle neuromusculaire après une reconstruction du ligament croisé antérieur

Résumé de l'objectif de recherche : évaluer l'intérêt d'un protocole d'entraînement au contrôle neuromusculaire sur la force et les capacités fonctionnelles de patients ayant bénéficié d'une chirurgie reconstructive du ligament croisé antérieur

1. Je, soussigné(e),, déclare avoir lu le document d'information et accepte de participer à l'étude de LE BALCH Marion.
2. J'ai reçu les explications concernant la nature, le but, la durée de l'étude et j'ai été informé de ce qu'on attend de ma part.
3. On m'a remis une copie de ce formulaire de consentement éclairé, signé et daté.
4. Je suis libre de participer à l'étude, ou non, d'abandonner ma participation à l'étude à tout moment sans qu'il soit nécessaire de justifier ma décision et que cela n'entraîne pas le moindre désavantage pour moi.
5. Les catégories de données qui seront utilisées dans le cadre de cette étude sont :
 - Les données personnelles à mon égard récoltées au début de l'étude
 - Les résultats que j'obtiendrais lors des tests de force musculaire et lors des tests fonctionnels lors des sessions d'évaluations
 - Les vidéos des tests fonctionnels que je réaliserais lors des sessions d'évaluations
6. J'accepte que ces données fassent l'objet de traitements ultérieurs à des fins scientifiques, en relation directe avec les objectifs de la recherche ci-dessus mentionnés, dans le respect de la loi Française 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à la protection de la vie privée à l'égard des traitements des données à caractère personnel. Mon nom, mes informations personnelles, les vidéos à mon égard seront gardés confidentiels. Les responsables scientifiques de cette étude et les personnes qui traiteront les données s'engagent à respecter la confidentialité de ces données.
7. J'accepte que les résultats de cette étude soient diffusés à des fins scientifiques et en respectant les règles déontologiques de la communauté scientifique.
8. Je peux, à tout moment, demander la consultation des données à caractère personnel collectées ou leur rectification. Ces données seront conservées durant le temps nécessaire à leur analyse, et jusqu'à un maximum de dix années. La responsable du traitement de ces données (LE BALCH Marion) peut être contactée à l'adresse suivante : lbhmarion@gmail.com.
9. Je consens de mon plein gré à participer à cette étude.

Sujet	Étudiant/responsable des données
A....., le..... Signature du participant, précédée de la mention « lu et approuvé » :	Je confirme que j'ai expliqué la nature, le but et la durée de l'étude au sujet mentionné ci-dessus. Le sujet confirme son accord par sa signature et son approbation datées. A....., le..... Signature :

Annexe II : consignes standardisées pour le passage des tests fonctionnels de saut

Single Hop Test :

1. Placez votre talon au niveau de la ligne du 0
2. Vous allez devoir réaliser la plus grande distance possible à cloche pied
3. Vous devez stabiliser votre réception au moins deux secondes sans que vos bras ou votre jambe opposée ne touche le sol
4. Vous allez réaliser 3 sauts d'échauffement pour vous familiariser avec le test et trois sauts évalués

Triple Hop Test :

1. Placez votre talon au niveau de la ligne du 0
2. Vous allez devoir réaliser trois sauts cloche-pied sans temps d'arrêt pour obtenir la plus grande distance possible
3. Vous devez stabiliser votre réception au moins deux secondes sans que vos bras ou votre jambe opposée ne touche le sol
4. Vous allez réaliser 3 sauts d'échauffement pour vous familiariser avec le test et trois sauts évalués

Crossover Hop Test :

1. Placez votre talon au niveau de la ligne du 0
2. Vous allez devoir réaliser trois sauts cloche-pied sans temps d'arrêt de part et d'autre d'une ligne de 15 cm de large pour obtenir la plus grande distance possible
3. Vous devez stabiliser votre réception au moins deux secondes sans que vos bras ou votre jambe opposée ne touche le sol
4. Vous allez réaliser 3 sauts d'échauffement pour vous familiariser avec le test et trois sauts évalués

Side Hop Test :





1. Vous devez effectuer le plus de sauts possibles sur une jambe en trente secondes de chaque côté de deux lignes éloignées de 40 cm.
2. Le nombre de sauts est comptabilisé. Si vous touchez une ligne ou que le pied se pose à l'intérieur de ces deux lignes, l'appui n'est pas comptabilisé.




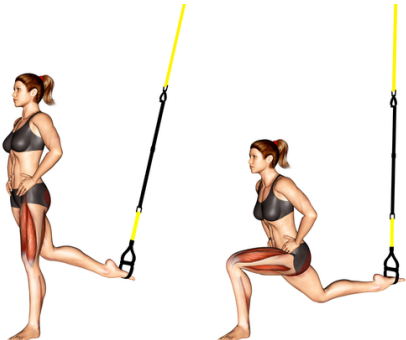

Vertical Drop Jump :

1. boîte

1. Debout sur une de 40cm, laissez-vous tomber au sol.
2. Restez le moins longtemps possible au sol et rebondissez le plus haut possible.

Annexe III : Ateliers proposés pour le travail fonctionnel du programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire

Atelier	Niveau initial	Progression
<p>Damier</p>		 <p>Changements : Réalisation cloche-pied</p>
<p>Échelle de rythme</p>		 <p>Changements : Réalisation cloche-pied</p>

<p>Box</p>		 <p>Changements : Réalisation cloche-pied</p>
<p>Horloge</p>		
<p>TRX ®</p>		
<p>Slide</p>		

Annexe IV : Corrélations entre les performances initiales de sujets et leur progression après le programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire

	Q- CONC60°/s	Q- CONC240°/s	IJ- CONC60°/s	IJ- CONC240°/s	IJ- EXC30°/s	Ratio IJ/Q- CONC60°/s
Progression	-0.278 (p= 0.506)	-0.485 (p= 0.223)	-0.724* (p= 0.042)	-0.919* (p= 0.001)	-0.289 (p= 0.488)	-0.380 (p= 0.353)

Tableau I : corrélations entre les valeurs initiales de force musculaire et de ratios et la progression de chaque sujet

Abréviations : Q = extenseurs du genou (quadriceps) ; IJ = fléchisseurs du genou (ischio-jambiers) ; CONC = concentrique ; EXC = excentrique

** : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.*

	Crossover- blessée	Side-saine	Side- blessée	TCS-2j	TCS-saine	TCS- blessée	H-blessée
Progression	-0.243 (p= 0.563)	-0.005 (p= 0.990)	-0.877 (p= 0.004)	-0.143 (p= 0.736)	-0.206 (p=0.624)	0.127 (p=0.764)	-0.623 (p=0.093)

Tableau II : corrélations entre les valeurs initiales fonctionnelles la progression de chaque sujet

Abréviations : TCS = temps de contact au sol ; H= hauteur

** : différence pré/post-intervention, significative à un seuil fixé à 0,05.*

Annexe V : caractéristiques des participants concernant le test de saut expérimental (change of direction test)

Sujet	Age	Poids	Taille	Jambe dominante	Jambe opérée	Type de chirurgie	Date de la chirurgie	Date de la blessure	Lésions associées	Antécédents	Délai post-opératoire	Sport pratiqué	Longueur membres inférieurs	Hauteur à 90° de flexion de genou
S9	25	85	186	G	G	DIDT	12/06/2019	Sept-18	Ménisque G	RAS	6	Football	115	76
S10	22	80	183	D	D	DIDT	11/06/2019	Avr-19	Fissure ménisque D	RAS	7	Volleyball	110	73
S11	32	72	176	G	G	DIDT	31/07/2019	Mai-19	RAS	RAS	6	Football, badminton	108	71
S12	26	63	169	G	D	DIDT	26/05/2018	Mai-18	Ménisectomie D	LMA IJ droits	18	Football	94	65
S13	19	70	178	G	D	DIDT	29/10/2018	Juil-18	RAS	RAS	19	Karaté	110	72
S14	20	74	185	D	D	DIDT + renfort lat	23/07/2019	Juil-19	RAS	RAS	6	Football	115	71
S15	22	80	181	G	G	DIDT	11/07/2019	Avr-19	RAS	RAS	6,5	Handball	117	74
S16	39	64	175	D	D	DIDT	25/07/2019	Mai-19	RAS	RAS	6	Football	109	72
S17	24	70	176	D	D	DIDT	26/06/2020	Mars-19	RAS	RAS	7	Rugby	108	72
S18	24	70	175	G	D	DIDT	03/01/2019	Déc-18	RAS	RAS	14	Football	107	72
S19	30	95	177	D	G	KJ	27/01/2019	Déc-19	RAS	RAS	13	Rugby	108	70

Tableau I : Caractéristiques des participants blessés concernant le test de saut expérimental

Sujet	Âge	Poids	Taille	Jambe dominante	Antécédents LCA	Blessures de moins de 6 mois	Sport pratiqué (axe, pivot-contact)	Longueur membres inférieurs	Hauteur à 90° de flexion de genou
S20	21	72	178	GAUCHE	NON	NON	Football	100	70
S21	25	70	174	DROITE	NON	Blocage genou G match sans arrêt sportif	Football	102	66
S22	27	89	182	DROITE	NON	NON	Football	106	70
S23	35	75	171	DROITE	NON	NON	Trail, football	101	60
S24	20	61	173	GAUCHE	NON	NON	Saut à la perche, volleyball	102	63
S25	28	62	168	GAUCHE	NON	NON	Football	101	58
S26	23	61	170	DROITE	NON	NON	Football	99,5	69
S27	36	66	173	GAUCHE	NON	NON	Badminton	103	67
S28	30	73	178	DROITE	OUI	NON	Football	101	68
S29	25	68	185	GAUCHE	NON	NON	Basketball	104	71
S30	27	70	175	DROITE	NON	NON	Judo	101	67
S31	25	75	180	DROITE	NON	NON	Karaté	102	68
S32	23	65	168	DROITE	NON	NON	Basketball	93	59
S33	30	52	169	GAUCHE	NON	NON	Football	97	61
S34	29	69	173	GAUCHE	NON	NON	Rugby	102	60

Tableau II : caractéristiques des participants sains concernant saut expérimental

Annexe VI : Représentation schématique du test de saut expérimental (change of direction test)

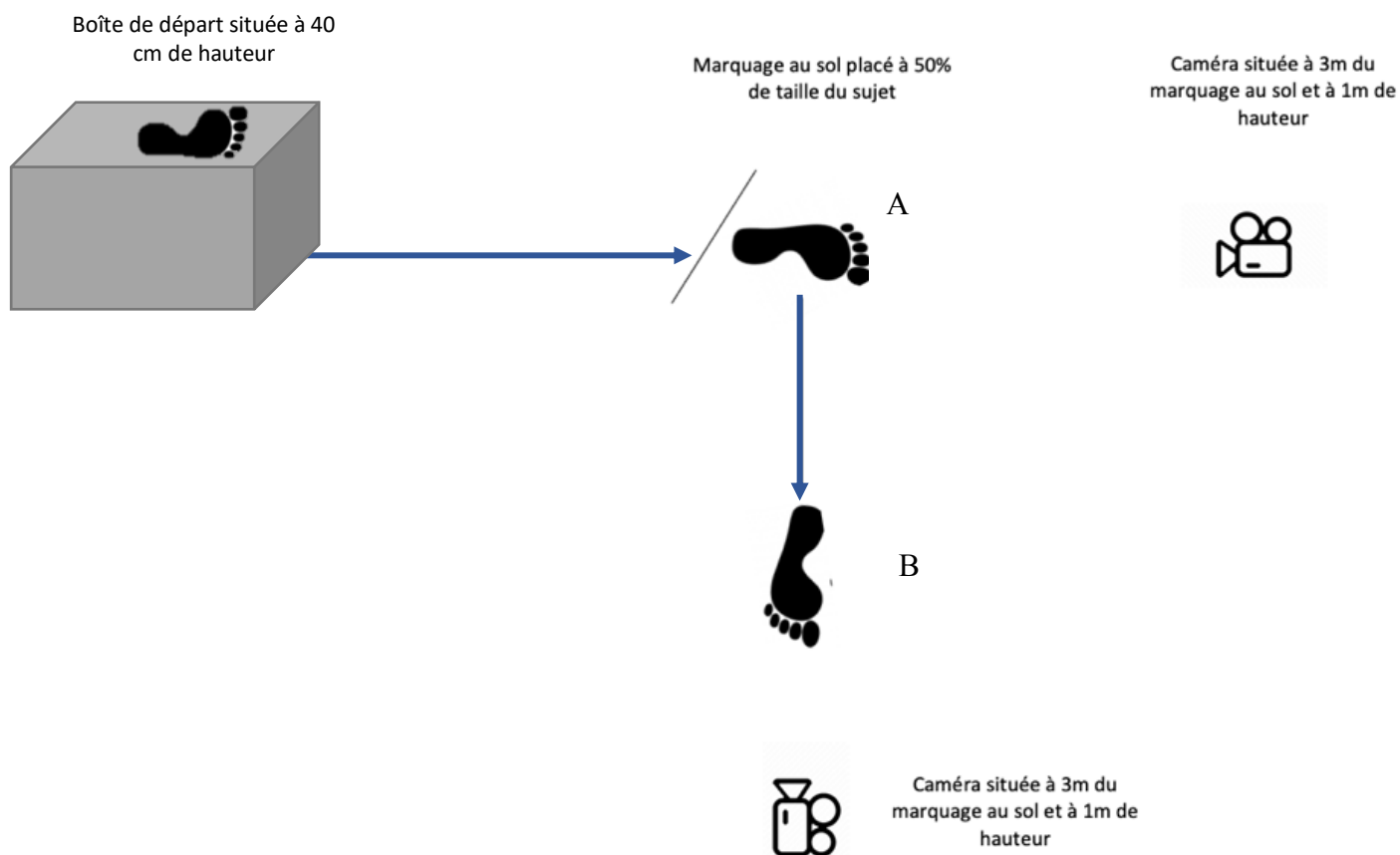


Figure 1 : représentation imagée du test de saut expérimental pour le test du membre inférieur gauche

Si le membre testé est le membre inférieur gauche, le sujet devra se tenir en appui unipodal sur le membre inférieur droit sur la boîte. Il devra effectuer une première réception au sol sur la jambe gauche, après un repère fixé à 50% de sa taille, et enchaîner avec un saut à 90° vers la droite en se réceptionnant sur sa jambe droite le plus loin possible.

Annexe VII : reproductibilité du change of direction test (test expérimental)

	Différence absolue entre les sessions * (en cm)	CCI (IC95)	ESM (en cm, (IC95))	MCD (en cm, (IC95))
Intra-opérateur				
Population saine	0,07 ± 1,37	0,99 (0,97-1,00)	1,74 (1,27-2,74)	3,10 (2,27-4,89)
Population opérée	1,55 ± 1,23	0,99 (0,97-1,00)	1,81 (1,37-2,67)	3,19 (2,41-4,72)
Inter-opérateur				
Population saine	-0,40 ± 1,14	0,99 (0,98-1,00)	1,46 (1,07-2,31)	3,12 (2,28-4,92)
Population opérée	0,11 ± 0,48	0,98 (0,97-1,00)	0,70 (0,53-1,04)	3,15 (2,38-5,33)

Tableau I : fiabilité de l'évaluation de la distance lors du change of direction test

*Abréviations : CCI = coefficient de corrélation intra-classe, IC95 = intervalle de confiance à 95% ,
ESM = erreur standard de mesure, MCD = minimum de changement détectable.*

**Moyenne ± écart-type*

	Différence absolue entre les sessions * (en ms)	CCI (IC95)	ESM (en ms, (IC95))	MCD (en ms, (IC95))
Intra-opérateur				
Population saine	0,47 ± 6,32	0,99 (0,97-1,00)	8,08 (5,91-12,74)	22,37 (16,38-35,28)
Population opérée	5,29 ± 5,58	0,98 (0,97-1,00)	8,19 (6,19-12,11)	219,03 (166,50- 323,91)
Inter-opérateur				
Population saine	-1,23 ± 4,36	0,97 (0,96-1)	5,56 (4,07-8,77)	22,37 (16,38-35,28)
Population opérée	4,55 ± 12,65	0,97 (0,96-0,99)	18,56 (14,02- 27,45)	218,48 (165,09- 323,09)

Tableau II : fiabilité de l'évaluation du temps de contact, obtenu grâce à l'application Myjump2 (version 5.1 by Dr. Carlos Balsalobre-Fernandez), lors du change of direction test

*Abréviations : CCI = coefficient de corrélation intra-classe, IC95 = intervalle de confiance à 95%,
ESM = erreur standard de mesure, MCD = minimum de changement détectable.*

**Moyenne ± écart-type*

	Différence absolue entre les sessions *	CCI (IC95)	ESM (IC95)	MCD (IC95)
Intra-opérateur				
Population saine	0,00 ± 0,43	0,89 (0,70-0,96)	0,54 (0,40-0,86)	0,31 (0,23-0,49)
Population opérée	-0,19 ± 0,39	0,87 (0,70-0,95)	0,57 (0,43-0,84)	0,31 (0,24-0,47)
Inter-opérateur				
Population saine	0,03 ± 0,31	0,94 (0,82-0,98)	0,39 (0,29-0,62)	0,29 (0,21-0,46)
Population opérée	-0,24 ± 0,33	0,91 (0,77-0,96)	0,48 (0,36-0,71)	0,30 (0,23-0,44)

Tableau III : fiabilité de l'évaluation qualitative du change of direction grâce à la grille SL-LESS score

Abréviations : CCI = coefficient de corrélation intra-classe, IC95 = intervalle de confiance à 95% ;

ESM = erreur standard de mesure, MCD = minimum de changement détectable ;

**Moyenne ± écart-type*

Mots clés

- ⇒ Batterie de tests
- ⇒ Contrôle neuromusculaire
- ⇒ Ligament croisé antérieur (LCA)
- ⇒ Retour au sport
- ⇒ Sport de pivot

Keywords

- ⇒ Anterior cruciate ligament (ACL)
- ⇒ Neuromuscular training
- ⇒ Pivot sport
- ⇒ Return to sport / return to play
- ⇒ Test battery

Résumé

Introduction : La rupture du ligament croisé antérieur est courante, principalement dans les sports de pivot. Elle nécessite classiquement une intervention chirurgicale et une rééducation, qui occasionnent néanmoins des difficultés à retourner au sport à un niveau antérieur. **Objectif :** un programme d'entraînement au contrôle neuromusculaire suite à une chirurgie du ligament croisé antérieur est nécessaire pour améliorer les performances musculaires et fonctionnelles des sujets. **Méthodes :** parmi les patients suivis au centre de kinésithérapie du sport « L'Ekippe » et opérés du ligament croisé antérieur, huit ont rempli les critères d'inclusion afin de participer à ce travail. Ils ont suivi cinq semaines d'entraînement au contrôle neuromusculaire, composé de renforcement musculaire et d'ateliers fonctionnels ayant pour objectifs principaux d'améliorer la force, la résistance excentrique, l'amorti et la pliométrie. Les performances ont été mesurées lors de deux sessions d'évaluation avec la mise en place d'un test isocinétique et de tests fonctionnels de saut (hop tests). **Résultats :** Le protocole a permis d'améliorer les performances musculaires des extenseurs et des fléchisseurs de genou des participants au niveau du membre inférieur opéré ainsi que des performances fonctionnelles de la jambe saine et de la jambe opérée lors du side hop test et du vertical drop jump. **Conclusion :** un protocole d'entraînement au contrôle neuromusculaire semble être nécessaire dans la prise en charge d'un sportif ayant bénéficié d'une reconstruction du LCA de sorte à optimiser la reprise sportive. Néanmoins, la durée de ce protocole pourrait en partie conditionner l'issue de ce programme.

Abstract

Introduction: Knee sprain and Anterior cruciate ligament injury is a common injury, in pivot sports. However, surgery rehabilitation often fails to restore complete pre-injury capacities, resulting in long-term deficits and difficulty in returning to sport. **Objective:** A neuromuscular control training program following ACL surgery would improve muscular and functional abilities of participants, **Methods:** Among the patients followed at the sports physiotherapy center "L'Ekippe" after a knee surgery, eight met the inclusion criteria to participate in such program. Participants underwent five weeks of neuromuscular control training, consisting of strengthening and functional exercises which aimed to improve strength, eccentric resistance, cushioning and plyometrics. Performance was measured during two evaluation sessions with the implementation of an isokinetic test and functional jump tests (hop tests). **Results:** The program improved the muscular performance of the knee flexors and extensors of the participants at the operated lower limb as well as the functional performance of both legs during the side hop test and the vertical drop jump. **Conclusion:** A neuromuscular control training protocol seems to be necessary in the management of an athlete who has undergone ACL reconstruction. Nevertheless, the duration of the program should be considered to reach better results.