



HAL
open science

Retour au sport après reconstruction du ligament croisé antérieur : apport de la course à pied.

Alexandre Jean-Marie Rambaud

► To cite this version:

Alexandre Jean-Marie Rambaud. Retour au sport après reconstruction du ligament croisé antérieur : apport de la course à pied.. Sciences de l'Homme et Société. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSES057 . tel-04505287

HAL Id: tel-04505287

<https://hal.science/tel-04505287>

Submitted on 14 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2018LYSES057

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
L'Université Jean Monnet

Ecole Doctorale 488
Sciences-Ingénierie-Santé

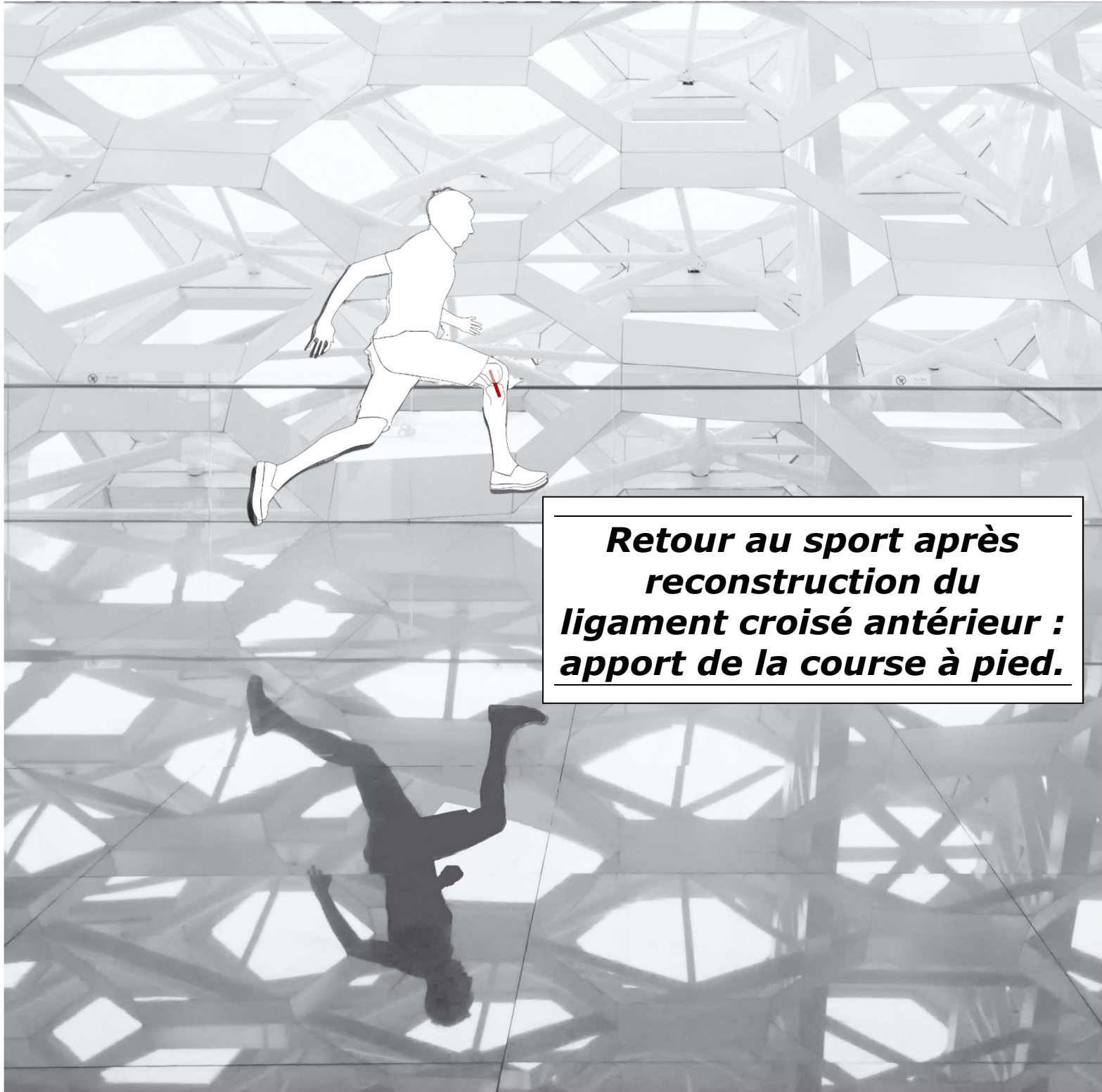
Doctorat : Sciences, Technologies, Santé
Mention : Motricité humaine et handicap

Soutenue publiquement le 04/12/2018, par :
Alexandre Rambaud

***Retour au sport après reconstruction du
ligament croisé antérieur : apport de la
course à pied.***

Devant le jury composé de :

M. Pr Emmanuel Coudeyre	<i>PUPH Université de Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand</i>	<i>Président</i>
Mme. Pr Patricia Thoreux	<i>PUPH Université Paris VI, Paris</i>	<i>Rapporteur</i>
M. Pr Daniel Theisen	<i>PU Luxembourg Institute of Health, Luxembourg</i>	<i>Rapporteur</i>
M. Mario Bizzini	<i>Schulthess Klinik, Zürich, Suisse</i>	<i>Examineur</i>
M. François Fourchet	<i>Hôpital de La Tour, Genève, Suisse</i>	<i>Examineur</i>
M. Pascal Edouard	<i>MCUPH, HDR Université Jean Monnet, Saint Etienne</i>	<i>Directeur de thèse</i>
M. Pierre Samozino	<i>MCF Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget-du-Lac</i>	<i>Co-directeur de thèse</i>
M. Jeremy Rossi	<i>MCF Université Jean Monnet, Saint Etienne</i>	<i>Co-directeur de thèse</i>



***Retour au sport après
reconstruction du
ligament croisé antérieur :
apport de la course à pied.***

Par Alexandre Rambaud

Résumé

Après reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur (LCA), le retour au sport se fait en trois étapes : la reprise des activités sportives sollicitant peu le LCA, la reprise de l'entraînement sans restriction mais sans compétition, et la reprise de la compétition. La course à pied fait partie des activités sollicitant faiblement le LCA, et représente un élément de base pour la plupart des activités sportives. A ce titre la reprise de la course à pied représente un élément incontournable de la séquence de retour au sport. Cependant, il n'est pas clairement établi son moment et ses critères de reprise, ainsi que sa place dans l'évaluation de la reprise de l'entraînement et de la compétition. L'objectif de ce travail de thèse a donc été de définir les critères de reprise de la course à pied et sa place dans la décision de reprise du sport.

Concernant la reprise de la course à pied, le critère le plus utilisé retrouvé au travers d'une analyse exhaustive de la littérature était le délai postopératoire. Il était rarement associé à des critères cliniques, de force musculaire, et fonctionnels (dans 1 étude sur 5), ce qui ne permettait donc pas de tenir compte des différences inter-individuelles. Les critères fonctionnels les plus utilisés étaient ceux mesurés par les Hop Tests, permettant d'objectiver la récupération fonctionnelle. Nous avons rapporté qu'entre le 3^{ème} et le 4^{ème} mois postopératoires il existait une grande variabilité des résultats aux Hop Tests, objectivant une récupération fonctionnelle non-homogène à cette période correspondant à la période de reprise de la course à pied. De plus, lors des premières semaines de la reprise de la course à pied, les patients présentaient des adaptations de leur foulée par une diminution de la longueur des foulées, permettant ainsi d'adapter le stress mécanique de la course à pied aux capacités d'absorption des contraintes du genou. Ainsi, il nous semble important que cette reprise de la course à pied soit déterminée de manière individuelle sur la base d'évaluation objective de la récupération du patient et non simplement des délais postopératoires.

Nous nous sommes aussi attachés à mieux comprendre les adaptations du pattern de course à pied à 6 mois postopératoires, correspondant au délai usuel de reprise du sport pivot/contact. A 6 mois postopératoires, les patients présentaient des adaptations biomécaniques, principalement objectivées par une asymétrie de la raideur biomécanique du membre inférieur, raideur plus importante au niveau du côté opéré. Cette asymétrie était également plus importante, à 6 mois postopératoires, chez les patients ayant subi une nouvelle blessure du LCA dans les 2 ans suivant la chirurgie. Ainsi, il nous semble que la mesure de la raideur biomécanique du membre inférieur, et son asymétrie, pourrait être un élément objectif permettant de mieux guider et ainsi optimiser la reprise du sport et la décision d'autorisation de la reprise du sport sans restriction.

En conclusion, à la lumière de ce travail de thèse, nous suggérons que l'autorisation de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA doit être prise sur la base d'une évaluation individuelle et objective, et que l'analyse de la course à pied, notamment à 6 mois postopératoires peut être un élément pertinent pour guider la reprise du sport pivot/contact et de compétition.

Présenté par: Alexandre Rambaud

Directeur: Dr Pascal EDOUARD

Co-directeur: Dr Pierre SAMOZINO

Co-encadrant: Dr Jérémy ROSSI

Mots clés : genou, retour au sport, course à pied, biomécanique, évaluations fonctionnelles.

Abstract

After anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction, the return to sport is a continuum including three elements: Return to participation, Return to sport (without restriction but no competition) and Return to performance (in competition). Running is an activity producing low ACL strains and is a basic element for most sports activities. So, the Return to running represents an essential element of the Return to sport continuum. However, the time and criteria to Return to running, as well as its place in the evaluation of the return to sport are unclear. The aim of this work was therefore to define the criteria for return to running and the place of running activity in the decision to return to sport.

Regarding the Return to running, the most commonly used criterion found through a scoping review analysis was the postoperative time. It was rarely associated with clinical, muscular strength, and functional criteria (in 1 in 5 studies), which was not awareness interindividual differences. The most used functional criteria were performance at the Hop Tests assessments, making objective functional criteria. We reported that between the 3rd and 4th postoperative months there was a great variability of Hop Tests results, showing a non-homogeneous functional recovery at this period corresponding to the Return to running. In addition, during the first weeks of the beginning of Return to running, the patients presented adaptations of their stride by a decrease in its length, thus making possible adaptation of running mechanical stress to knee strain absorption capabilities. Thus, we suggest that Return to running should be determined individually on the basis of objective evaluation of patient recovery and not simply postoperative times.

We also focused our work on better understanding the adaptations of the running pattern at 6 postoperative months, corresponding to the usual time of Return to sport. At 6 postoperative months, the patients presented biomechanical adaptations, mainly objectified by an asymmetry of the biomechanical lower limb stiffness, presenting higher values on the operated side. This asymmetry was also greater, at 6 postoperative months, in patients who had a new ACL injury within 2 years after surgery. Thus, we suggest that the measurement of the biomechanical lower limb stiffness, and its asymmetry, could be an objective element to better orient and thus optimize the Return to sport and its decision-making.

In conclusion, in the light of this work, we suggest that the decision-making of Return to run after ACL reconstruction should be done by taking into account individual and objective evaluation, and analysis of running, especially at 6 postoperative months can be a relevant element to orient the Return to sport.

Presented by: Alexandre Rambaud

Supervisor: Dr Pascal EDOUARD

Co-supervisor: Dr Pierre SAMOZINO

Co-supervisor: Dr Jérémy ROSSI

Key words: knee, return to sport, running, biomechanics, functional assessments.

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité de l'Université Jean Monnet. Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide d'un grand nombre de personnes que j'aimerais remercier.

A mes directeurs de thèse.

Monsieur le Docteur Pascal Edouard

Merci pour tout ! Cet encadrement à commencer par un article en 2012 sur une pathologie très fréquente chez le coureur à pied : le syndrome fémoro patellaire. Finalement, il est logique que ce projet autour du ligament croisé antérieur se soit tourné vers la course à pied. Grâce à ton aide et à tes conseils, j'ai pu mener à bien ce projet. Merci pour ce suivi régulier et parfois sportif qui m'a permis de garder le cap.

Monsieur le Docteur Pierre Samozino

Merci pour tes conseils, ta rigueur et ton pragmatisme durant cette thèse. Ton approche « macroscopique » de la locomotion m'a beaucoup aidé, et m'apporte énormément dans ma pratique clinique.

Monsieur le Docteur Jeremy Rossi

Merci pour ton accompagnement et de m'avoir fait découvrir les joies de Matlab ! Encore merci pour ces nombreuses discussions autour de la biomécanique et ta vision de la locomotion.

A mes rapporteurs.

Madame la Pr Patricia Thoreux

C'est un immense honneur de vous compter parmi le jury de ce travail. Merci d'avoir accepté d'évaluer ce travail que vous avez vu naître pendant mon travail de master 2. Votre aide précieuse et votre grande expertise de l'orthopédie m'ont permis également de mener à bien la réalisation de travaux scientifiques. Encore merci pour votre bienveillance à mon égard.

Monsieur le Pr Daniel Theisen

Vous me faites un grand honneur en acceptant de juger ce travail de votre expérience et de votre regard d'expert. Permettez-moi à travers ces quelques mots, parfois maladroits, de vous présenter ma plus profonde gratitude et mon plus profond respect.

A mon jury.

Monsieur le Pr Emmanuel Coudeyre

Merci infiniment d'avoir accepté de porter sur ce travail votre regard expert. Permettez-moi à travers ces quelques mots de vous présenter ma plus profonde gratitude.

Monsieur le Dr Mario Bizzini

C'est un grand plaisir de vous compter dans mon jury. Votre expertise dans la prévention des blessures du LCA et votre dynamisme dans la physiothérapie du sport est pour moi un modèle. Je vous en remercie chaleureusement.

Monsieur le Dr François Fourchet

Un grand merci François pour ton aide au cours de ce cursus universitaire. Ta bienveillance et ton expertise m'ont accompagné tout au long de ces travaux scientifiques et parfois plus. J'espère que l'aventure continuera !

Je tiens également à remercier les membres du LIBM de Saint Etienne dirigé par Thierry Busso ainsi que ses membres et personnels. Merci à Thomas Lapole pour les collaborations autour des vibrations et la rééducation, qui j'en suis sûr, auront un bel avenir.

Merci également aux membres de **l'Unité de médecine du sport du CHU de Saint Etienne**, le Pr Léonard Feasson, le Dr David Hupin, le Dr Marie Lafleur, le Dr Clément Foschia, mais également le Dr Caroline Perin qui m'a aidé pendant les évaluations.

Merci au Pr Rémi Philippot et au Dr Thomas Neri pour leurs conseils et leur aide dans le recrutement des patients, mais aussi au cours d'autres projets scientifiques. Un grand merci au Dr Bertrand Semay avec qui j'ai commencé l'aventure et avec qui j'ai partagé le stress des premières évaluations !

Merci également à mes Codoctorants Robin, Angèle, Thibaut et Loic.

Merci aux étudiants avec qui j'ai collaboré (Alexandre, Justine et Gaetan) et qui ont contribué par leur travail à l'avancée et la rédaction de cette thèse.

A mes anciens professeurs de l'IFMK, Chantale Devaux, Hervé Fouquet et à toute l'équipe pédagogique de l'IFMK pour leur encouragement.

J'aurais une pensée émue pour François et Ludivina. J'ai eu la chance de les connaître et de travailler avec eux. Ils m'ont transmis cette passion pour la kinésithérapie et la traumatologie sportive.

Aux enseignants de Font-Romeu. C'est bien lors de ces semaines de formations que j'ai pu découvrir des collègues passionnés par la kinésithérapie du sport et par l'amélioration de nos pratiques. Merci donc à Jean-Paul, Patrick et Franck pour tous ces bons moments là-haut qui ont été suivis par des projets ambitieux et passionnants. Un grand merci pour vos encouragements.

Merci également à la **Société Française des Masseurs-Kinésithérapeutes du Sport** et à son président Franck Lagniaux. Encore une fois, merci Franck pour ta confiance et ton soutien dans nos projets communs.

Merci à mes collègues de la **Société Française de Physiothérapie**, notamment Thomas Rulleau, Thomas Guemann et Jean Philippe Regnaud. Vos encouragements et vos conseils m'ont été précieux lors de la dernière ligne droite !

A mes amis du Kabat's club, Nico, Greg, Bertrand, Romain, Kader. Les liens que nous avons construits depuis nos études de kinés sont toujours là, malgré les années.

Merci à mes collègues du cabinet, Stephane, Astrid, Guillaume, Gaetan, et Antoine. Sans votre aide et soutien, il m'aurait été impossible de réaliser ce travail.

Pour tout et surtout, un grand merci à ma famille et belle-famille... Merci de votre soutien. J'aimerais remercier Stephane, mon frère, de m'avoir transmis malgré lui la fibre de la recherche.

Pour finir, j'aimerais remercier ma femme Florianne et mes enfants Lorelei, Pierrick et Romuald pour leur amour et leur compréhension tout au long de ces années de doctorat.

Ce travail a fait l'objet des publications et communications suivantes

Publications dans des revues scientifiques internationales SCI à comité de lecture

- 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. *Br J Sports Med*, bjsports-2017-098602.
- 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

Publications dans des revues scientifiques françaises sans comité de lecture

- Rambaud, A.**, Fourchet, F., Neri, T., & Edouard, P. (2018). Critères de retour au sport après reconstruction du ligament croisé antérieur : dernières recommandations de la littérature. *Kinésithérapie Scientifique*, Juillet (600), 12–22. (50^{ème} journées de l'Institut National de la Kinésithérapie)
- Rambaud, A.**, Samozino, P., & Edouard, P. (2016). Les tests fonctionnels dans le suivi des ligamentoplasties du LCA : l'exemple des Hop tests. *Kinésithérapie Scientifique*, Juin (577), 55–57.
- Rambaud, A.**, & Edouard, P. (2015). Intérêt d'une analyse biomécanique de la course couplée à une analyse fonctionnelle durant la phase de retour au sport après chirurgie du Ligament Croisé Antérieur du genou. *Kinésithérapie Du Sport Information*, Novembre 2015,15-22
- Rambaud, A.**, Chazal, A., Moret, S., & Edouard, P. (2015). Place des tests fonctionnels dans l'évaluation de la force musculaire du membre inférieur : Utilisation des hop tests. *Kinésithérapie Scientifique*, 2015(569), 37–40.(Congrès Muscle et cartilage, Journées de l'Institut National de la Kinésithérapie, 9 et 10 octobre 2015)

Communications dans des congrès internationaux avec actes

- Rambaud, A. J. M.**, Rossi, J., Fourchet, F., Samozino, P., & Edouard, P. (2017a). Single and triple hop tests may support return to run decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport*, 28, e17. (2nd World Conference on Sports Physical Therapy, 6 et 7 Octobre 2017, Belfast)
- Rambaud, A. J. M.**, Rossi, J., Fourchet, F., Samozino, P., & Edouard, P. (2017b). Stiffness running parameters as a return to sport criterion after an anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport*, 28, e17. (2nd World Conference on Sports Physical Therapy, 6 et 7 Octobre 2017, Belfast)

Communications dans des congrès nationaux

- Rambaud, A. J.-M.**, Rossi, J., Edouard, P., & Samozino, P. (2017) Analyse biomécanique de la course à pied sur tapis roulant à 6 mois postopératoires après reconstruction du ligament croisé antérieur (LCA). (2017) Poster. (Journée de la Recherche de l'École Doctorale Sciences Ingénierie et Santé, EDSIS 488, 15 juin 2017, Saint Etienne).
- Rambaud, A. J.-M.**, Rossi, J., Edouard, P., & Samozino, P. (2017). Analyse biomécanique de la course à pied sur tapis roulant chez des patients opérés à 6 mois postopératoires d'une ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (LCA). *Kinésithérapie, la Revue*, 17(184), 95–96. (6^{ème} Journées Francophones de Kinésithérapie, 27,28 et 29 avril 2017, Paris)
- Rambaud, A.**, Edouard, P., Place de l'évaluation isocinétique des fléchisseurs et extenseurs du genou pour la décision de reprise du sport après chirurgie du Ligament Croisé Antérieur. (2016) Communication orale invitée. (18^{ème} Rencontres Isocinétiques, 25 novembre 2016, Paris)
- Rambaud, A.**, Semay, B., Morin, J.-B., Phillipot, R., Samozino, P., & Edouard, P. (2016). Interest of a biomechanical analysis of running on a treadmill coupled with functional testing and isokinetic evaluation during return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 59, e18. (31^{ème} Congrès de la SOFMER, 13,14 et 15 octobre 2016, Saint Etienne)

- Semay, B., **Rambaud, A.**, Philippot, R., & Edouard, P. (2016). Evolution of the anteroposterior laxity by GnRB at 6, 9 and 12 months post-surgical anterior cruciate ligament reconstruction. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 59, e19. (31ème Congrès de la SOFMER, 13,14 et 15 octobre 2016, Saint Etienne)
- Rambaud, A.**, Samozino, P., & Edouard, P. (2016). Functional tests can they help in the decision to return to sports after anterior cruciate ligament? Example with Hop tests. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 59, e19–e20. (31ème Congrès de la SOFMER, 13,14 et 15 octobre 2016, Saint Etienne)
- Rambaud, A.**, Reprise de la course à pied durant la rééducation des patients opérés d'une ligamentoplastie du LCA. (2016) Communication orale invitée SFMKS. (9ème Congrès SFMES-SFTS, 22, 23 et 24 septembre 2016, Pau)
- Rambaud, A.**, Les tests fonctionnels en rééducation, du suivi à la prévention. (2016) Atelier invité SFMKS. (9ème Congrès SFMES-SFTS, 22, 23 et 24 septembre 2016, Pau)
- Rambaud, A.**, Edouard, P., Utilisation des tests de sauts horizontaux unipodaux (Hop Tests) pour déterminer la date de reprise des activités sportives chez les patients opérés d'une ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (LCA) : étude pilote.(2016) Poster. (Journée IFRESIS/Académie de Médecine, 10 mai 2016, Saint Etienne).
- Rambaud, A.**, Utilisation des Hop Tests pour déterminer la date de reprise des activités sportives chez les patients opérés d'une ligamentoplastie du LCA, étude pilote. (2015) (8ème Congrès SFMES-SFTS, 17, 18 et 19 septembre 2015, Orléans)
- Rambaud, A.**, Intérêt d'une analyse biomécanique de la course couplée à une analyse fonctionnelle durant la phase de retour au sport après chirurgie du Ligament Croisé Antérieur du genou. (2015) (8ème Congrès SFMES-SFTS, 17, 18 et 19 septembre 2015, Orléans)
- Rambaud, A.**, Semay, B., Philippot, R., & Edouard, P. (2015). Utilisation des tests de sauts horizontaux unipodaux (Hop Tests) pour déterminer la date de reprise des activités sportives chez les patients opérés d'une ligamentoplastie du ligament croisé antérieur : étude pilote. *Kinésithérapie, La Revue*, 15(158), 58–59. (5ème Journées Francophones de Kinésithérapie, 5,6 et 7 février 2015, Lille)

Publications annexes à la thèse

Publications dans des revues scientifiques nationales à comité de lecture

- Del Rabal, H., Fudenburg, F., Moret, S., & **Rambaud, A.** (2017). Prévention de l'entorse de cheville chez les jeunes joueuses de football : élaboration et évaluation d'un protocole d'amélioration de l'équilibre de la cheville. *Kinésithérapie, La Revue*, 17(184), 32–33.

Publications dans des revues scientifiques françaises sans comité de lecture

- Picot, B., & **Rambaud, A.** (2016) Les tests cliniques et leur pertinence 1 : les tests méniscaux. *Kinésithérapie Du Sport Information* Septembre 2016, 15-17

Table des matières

Introduction.....	1
Partie I : État de la question	4
1.1 L'anatomie et la biomécanique du genou	5
1.1.1 L'anatomie descriptive de l'articulation du genou	5
1.1.2 Les moyens passifs de la stabilité articulaire.....	10
1.1.3 Les moyens actifs de la stabilité articulaire	14
1.2 Anatomie et biomécanique du Ligament Croisé Antérieur	18
1.2.1 L'anatomie du LCA	18
1.2.2 La fonction du LCA	19
1.2.3 Les propriétés mécaniques du LCA	20
1.3 La rupture du LCA.....	23
1.3.1 L'épidémiologie de la rupture du LCA.....	23
1.3.2 Les mouvements lésionnels	24
1.3.3 Le diagnostic	25
1.4 La Prise en charge thérapeutique de la rupture du Ligament Croisé Antérieur.....	27
1.4.1 La prise en charge de la phase aiguë après rupture du LCA.....	27
1.4.2 Le choix du traitement	28
1.4.3 Le traitement fonctionnel.....	29
1.4.4 Le traitement chirurgical : reconstruction du Ligament Croisé Antérieur.....	30
1.5 La rééducation après reconstruction du ligament croisé antérieur.....	33
1.5.1 La rééducation préopératoire	33
1.5.2 La rééducation postopératoire	34
1.5.3 La course à pied comme moyen de rééducation	36
1.6 Le Retour au sport.....	39
1.6.1 La définition du Retour au Sport : "Return To Sport continuum".....	39
1.6.2 La reprise de la course à pied.....	44
1.6.3 la reprise du sport pivot-contact.....	45
Problématique	49

Partie II. : Décision de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.....	52
2.1. Les critères de reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA	54
2.2. Intérêt des Hop Tests comme tests fonctionnels dans la décision de reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.	70
2.3. Liens entre la date de reprise de la course à pied et ses paramètres biomécaniques à 6 mois postopératoires d'une reconstruction chirurgicale du LCA.	95
2.4. Synthèse sur la décision de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.....	110
 Partie III. : La course à pied, critère de retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA.	114
3.1. Criteria for Return to Sport after ACL reconstruction: étude CR'STAL	117
3.2. Influence de la reconstruction chirurgicale du LCA sur les paramètres biomécaniques de la course à pied lors de la phase de retour au sport : étude contrôlée.....	134
3.3. Lien entre évaluation biomécanique de la course à pied à 6 mois postopératoires d'une reconstruction chirurgicale du LCA et nouvelle blessure du LCA.....	142
3.4 Synthèse sur la course à pied comme critère de retour au sport	151
 Partie IV. Discussion générale	154
4.1. Synthèse des travaux	155
4.2. Limites	159
4.3. Perspectives.....	160
4.4. Conclusions.....	163
 Bibliographie.....	165

Table des figures

Figure 1.1.1-1 Le complexe articulaire du genou, composé par l'articulation fémoro-patellaire et par l'articulation fémoro-tibiale.	.....5
Figure 1.1.2-1. Le plateau tibial et la zone intercondylienne d'après Standring (éditeur), Gray's Anatomy (2016).	.....7
Figure 1.1.1-3. Les mouvements de l'articulation du genou dans les 3 dimensions, en fonction des 6 degrés de libertés. D'après Standring (éditeur), Gray's Anatomy (2016).	.....9
Figure 1.1.2-1. La capsule articulaire de l'articulation du genou. Modifié d'après Standring (éditeur), Gray's Anatomy (2016) et Noyes et Barber-Westin 2017.	.....10
Figure 1.1.2-2. L'articulation du genou et ces ligaments.	.....11
Figure 1.1.2-3. Vue antérieure cadavérique des articulations fémoro-tibiales (médiale et latérale) et des ligaments croisés après ablation de la patella, tirée de Smigielski et al. (2016).	.....13
Figure 1.1.3-1. Les muscles de la face antérieure de la cuisse d'après Netter (2011).	.....15
Figure 1.1.3-2. Les muscles de la face postérieure de la cuisse d'après Netter (2011)	.....16
Figure 1.3.3-1. Les tests cliniques permettant pour mettre en évidence une rupture du ligament croisé antérieur les plus utilisés.	.....26
Figure 1.4.4-1. Reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur par allogreffe selon les deux techniques les plus utilisées.	.....32
Figure 1.6.1-1. Return to Sport continuum d'après Ardern et al. (2016).	.....40
Figure 1.6.1-2. L'évolution dans le temps de l'enveloppe de fonction du genou après une rupture du ligament croisé antérieur (LCA) d'après Dye (1996).	.....41
Figure 1.6.1-3. Le cadre décisionnel "Strategic Assessment of Risk and Risk Tolerance (StARRT)" pour la décision du retour à l'activité sportive. Shrier et al. (2015)	.....43
Figure 1.6.3-1. Simple saut (Single Hop Test for Distance ou SHT), le Triple saut (Triple Hop Test for Distance ou THT) et le Triple saut croisé stabilisé (Crossover Hop Test for Distance ou COTH) d'après Noyes et al. (1991).	.....46
Figure 1.6.3-2. Star Excursion Balance Test modifié. Gribble et al. (2012).	.....47
Figure 2.2-1. Simple saut (Single Hop Test for Distance ou SHT) et le Triple saut (Triple Hop Test for Distance ou THT).	.....72
Figure 2.2-2. Score de Marx (Marx et al.,2001) et Score de Tegner (Tegner and Lysholm, 1985)	.....74
Figure 2.3-1. Raideur biomécanique du membre inférieur lors de la course à pied.	....100
Figure 2.3-2. Force verticale de réaction du sol (vGRF) sur un pas lors de la course à pied.	....101
Figure 2.3-3. Corrélation entre la durée de reprise de la course à pied (Wcap) et la moyenne de la longueur du pas du membre sain (A) et opéré (B).	....104

Table des tableaux

Tableau 1.2.3-1. Contraintes subies par le LCA lors de différentes activités mesuré in vivo (Henning et al. 1985; Heijne et al. 2004)	.....21
Tableau 1.3.2-1. Mouvements lésionnels avec ou sans contact de la rupture du ligament croisé antérieur et leur fréquence (Murray et al. 2013) .	.....25
Tableau 1.5.3-1. Contraintes moyennes calculées exercées sur le plateau tibial lors de différentes taches de locomotion (Saxby et al. 2016a, 2016b).	.....38
Tableau 1.6.2-1. Règles de progression du programme de course à pied en fonction de la douleur (Adams et al. 2012).	.....45
Tableau 2.1-1. Critères les plus utilisés pour la reprise de la course à pied après reconstruction du ligament croisé antérieur.	.....56
Tableau 2.1-2. Analyse en sous-groupe des critères de temps pour la reprise de la course à pied, en fonction du protocole rééducatif (protecteur* ou contemporain‡) et de l'évolution des techniques opératoires (arthrotomie ou arthroscopie).	.....57
Tableau 2.3-1. Tableau des critères d'inclusion et d'exclusion à l'étude CR'STAL	.....99
Tableau 2.3-2. Tableau des valeurs globales des membres inférieurs et des valeurs de symétrie pour les variables biomécaniques lors d'une évaluation sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur.	.....103
Tableau 3.2-1. Caractéristiques du groupe CRSTAL et du groupe Contrôle	.....137
Tableau 3.2-2. Tableau des valeurs globales des membres inférieurs pour les variables biomécaniques lors d'une évaluation sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur et chez des patients sains.	.....138
Tableau 3.3-1. Caractéristiques des patients à 6 mois d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des deux sous-groupes (avec ou sans nouvelle lésion du LCA).	.....145
Tableau 3.3-2. Comparaisons intra-groupes des évaluations biomécaniques de la course à pied sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des sous-groupes (avec ou sans nouvelle lésion du LCA).	.....146
Tableau 3.3.3. Comparaisons inter-groupe des évaluations biomécaniques de la course à pied sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des sous-groupes (avec ou sans nouvelle lésion du LCA).	.....147

Liste des principales abréviations utilisées dans ce manuscrit

AM	ANTERO-MEDIAL
AI	<i>ASYMMETRY INDEX</i> OU INDICE D'ASYMETRIE
AMI	<i>ARTHROGENIC MUSCLE INHIBITION</i>
BW	<i>BODY WEIGHT</i> : POIDS DU CORPS
CCF	CHAINE CINETIQUE FERMEE
CCO	CHAINE CINETIQUE OUVERTE
COTH	<i>CROSSOVER HOP TEST FOR DISTANCE</i>
DIDT	DROIT INTERNE/ DEMI TENDINEUX
GRF	<i>GROUND REACTION FORCE</i> (FORCE DE REACTION DU SOL)
HAS	HAUTE AUTORITE DE SANTE
IFSPT	<i>INTERNATIONAL FEDERATION OF SPORTS PHYSICAL THERAPY</i>
IKDC	<i>INTERNATIONAL KNEE DOCUMENTATION COMMITTEE</i>
KJ	KENNETH JONES
KLEG	VARIABLE DE RAIDEUR DU MEMBRE INFERIEUR (KN/M)
LCA	LIGAMENT CROISE ANTERIEUR
LCL	LIGAMENT COLLATERAL LATERAL
LCM	LIGAMENT COLLATERAL MEDIAL
LCP	LIGAMENT CROISE POSTERIEUR
LSI	<i>LIMB SYMMETRY INDEX</i>
LSTRIDE	LONGUEUR DE LA FOULEE PENDANT LA COURSE A PIED (EN M)
PAPL	POINT D'ANGLE POSTERO-LATERAL
PAPM	POINT D'ANGLE POSTERO-MEDIAL
PL	POSTERO-LATERAL
PM	POSTERO-MEDIAL
RTS	<i>RETURN TO SPORT</i>
RTR	<i>RETURN TO RUN</i>
SEBT	<i>STAR EXCURSION BALANCE TEST</i>
SHT	<i>SINGLE HOP TEST FOR DISTANCE</i>
THT	<i>TRIPLE HOP TEST FOR DISTANCE</i>
TSK-11	<i>TAMPA SCALE FOR KINESOPHOBIA</i>
WRUN	INTERVALLE DE TEMPS SEPARANT LA DATE DE REPRISE DE LA COURSE A PIED ET L'EVALUATION (EN SEMAINES)

Introduction



La rupture du ligament croisé antérieur (LCA) est une blessure fréquente, aux conséquences importantes pour le patient : à court terme, elle est à l'origine d'altérations significatives de la qualité de vie (Lohmander et *al.*, 2004; Micheo et *al.*, 2010), et à long terme elle est à l'origine d'un risque d'arthrose précoce (Cantin et *al.*, 2016). Cette blessure touche le plus souvent des jeunes sportifs pratiquant un sport de pivot/contact (football, handball, basketball, rugby, etc.) en compétition (Seil et *al.*, 2016). Dans cette population, le traitement le plus fréquent est la reconstruction chirurgicale du LCA. Cette dernière a pour objectif de rendre au genou la stabilité dont il a besoin afin de permettre un retour au sport.

Après cette chirurgie, la rééducation commence le plus souvent dès le lendemain de l'opération, et se termine lors du retour sur les terrains de sport, généralement après le 6^{ème} mois postopératoire. Le but de cette rééducation est de guider et d'accompagner la récupération fonctionnelle du membre opéré, afin qu'il retrouve ses capacités fonctionnelles et de performances (Ebert et *al.*, 2017). Le protocole de rééducation se doit d'être progressif et global, incluant le renforcement musculaire des membres inférieurs et des exercices de contrôle moteur et proprioceptifs (Shelbourne and Klotz, 2006; van Melick et *al.*, 2016). Ce protocole est guidé au fil des semaines par la cicatrisation de l'articulation et par les capacités mécaniques du greffon (Heijne et *al.*, 2004; Henning et *al.*, 1985). La prise en charge doit également avoir pour objectif de prévenir la survenue de nouvelles blessures (récidive, rupture du LCA controlatéral, blessures musculaires ou articulaires). La décision du retour au sport est l'ultime étape de cette prise en charge, et sous-entend la réussite de la reconstruction du LCA (Lynch et *al.*, 2013). Le retour au sport est autorisé s'il y a notamment une bonne récupération des capacités fonctionnelles du patient avec le moins de déficience possible. En effet, lors de la phase de retour au sport, une altération de la biomécanique du membre inférieur pendant les activités de marche et de course à pied a été identifiée comme facteur prédictif de récurrence de rupture du LCA chez des patients jeunes et sportifs (Paterno et *al.*, 2010).

La course à pied est l'activité fondamentale de nombreux sports pivots/contacts, et se différencie de la marche par une alternance d'appuis unipodaux, entrecoupés d'une phase sans appui : la phase de vol. Cette activité se caractérise notamment par une succession de bondissements réguliers, permettant d'augmenter entre autres la vitesse de locomotion. Cette activité demande des ajustements très complexes de l'équilibre, de l'activité musculaire et de la coordination des membres inférieurs (Lacouture et *al.*, 2013; Morin and Samozino, 2018). **Compte tenu de ces contraintes, la décision d'autorisation de reprise de la course à pied**

après une reconstruction chirurgicale du LCA semble être une décision non négligeable. En effet, celle-ci doit prendre en compte la capacité du genou et des membres inférieurs à assumer les contraintes liées à la course à pied qui est un élément essentiel pour la reprise de l'ensemble des activités sportives. Ainsi, notre première problématique de recherche a été de s'interroger sur les éléments permettant d'autoriser la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.

De plus, au moment de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA, il persiste une asymétrie biomécanique (Sigward et *al.*, 2016), qui peut perdurer près de 2 ans après la chirurgie (Bowersock et *al.*, 2017; Roewer et *al.*, 2011). Or ces modifications seraient aussi responsables de l'apparition précoce d'arthrose (Andriacchi et *al.*, 2004). Il semblerait donc que les conséquences de cette chirurgie pourraient être délétères pour l'avenir de l'articulation du genou lorsque ces déficits biomécaniques perdurent. **Ainsi l'analyse des paramètres de la course à pied dans les suites d'une reconstruction chirurgicale du LCA, et plus précisément lors de la reprise du sport avec pivot/contact, pourrait permettre de mieux comprendre la récupération fonctionnelle de ces patients, et ainsi de préciser la décision concernant la reprise du sport. Notre seconde problématique de recherche a donc consisté à s'interroger sur l'existence de modifications de la biomécanique de la course à pied au moment de la reprise du sport après reconstruction chirurgicale du LCA, et comprendre si elles ont une influence sur la reprise du sport.**

Ce travail de thèse a été réalisé dans le Laboratoire Inter-universitaire de Biologie de la Motricité (EA 7424) des universités Jean Monnet (Saint-Etienne) et Savoie Mont Blanc (Chambéry). Il s'est donc intéressé à l'apport de la course à pied dans le retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA, de par sa description et son évaluation pendant cette phase cruciale. La première partie de ce travail de thèse est un rappel de l'anatomie fonctionnelle et biomécanique de l'articulation du genou, de la description de la rupture du LCA et de sa prise en charge thérapeutique, et enfin de la rééducation post-chirurgicale jusqu'au retour au sport. La deuxième partie s'intéresse à la reprise de l'activité de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA. La troisième partie traite de l'évaluation de la course à pied pendant la phase de retour au sport et les liens potentiellement existants entre les paramètres biomécaniques et la survenue de nouvelles blessures.

Partie I :

État de la question

1.1 L'ANATOMIE ET LA BIOMECHANIQUE DU GENOU

Le complexe articulaire du genou est l'articulation intermédiaire du membre inférieur, alliant mobilité et stabilité, afin de permettre les activités de locomotion simple comme la marche, mais aussi les activités supérieures de la marche plus complexes en termes de force, de coordination et de proprioception telles que la montée et descente d'escaliers, les sauts verticaux et horizontaux, la course à pied, les sprints, et les changements de direction. Ces derniers sont principalement utilisés lors des sports avec pivot/contact comme le football, le handball, le rugby ou encore le basketball.

1.1.1 L'ANATOMIE DESCRIPTIVE DE L'ARTICULATION DU GENOU

1.1.1.1 Rappels généraux sur le complexe articulaire du genou

Le complexe articulaire du genou est composé de 2 articulations : l'articulation fémoro-patellaire entre le fémur et la patella, et l'articulation fémoro-tibiale entre le fémur et le tibia qui comporte deux compartiments : le compartiment médial et le compartiment latéral (Figure 1.1.1-1).

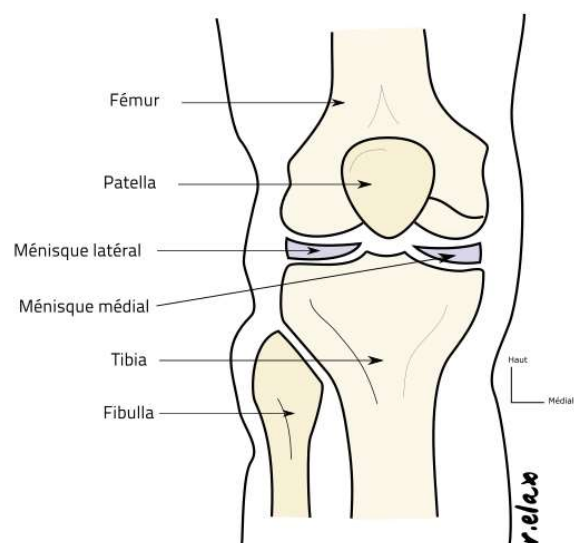


Figure 1.1.1-1 Le complexe articulaire du genou, composé par l'articulation fémoro-patellaire et par l'articulation fémoro-tibiale.

L'articulation fémoro-patellaire met en relation la trochlée fémorale avec les facettes postérieures de la patella. Elle sert de poulie à l'appareil extenseur. Son cartilage très épais permet des contraintes importantes en compression et en glissement (Dufour and Pillu, 2007). Pour la suite, seuls les aspects concernant l'articulation fémoro-tibiale seront abordés.

L'articulation fémoro-tibiale est une articulation bicondylienne. Les condyles fémoraux médial et latéral s'articulent avec les plateaux tibiaux correspondants, par l'intermédiaire de ménisques (Dufour and Pillu, 2007).

1.1.1.2 Les surfaces articulaires

Le complexe articulaire du genou est recouvert d'un cartilage articulaire, hyalin, lisse, permettant d'obtenir un coefficient de frottement extrêmement bas, favorisant les roulements et les glissements lors du mouvement de flexion/extension.

Les condyles fémoraux

Les condyles fémoraux constituent l'extrémité distale du fémur, et sont recouverts de cartilages articulaires. Les condyles sont presque entièrement convexes et leur courbure suit une spirale (celle du condyle latéral est la plus grande). Ils sont séparés par une dépression large et profonde, l'échancrure condylienne (Standring, 2016).

Le plateau tibial

L'extrémité proximale du tibia, nommé plateau tibial, est inclinée vers le bas et l'arrière par rapport au grand axe de la diaphyse tibiale. Cet angle est appelé "pente tibiale", et il est compris entre 5° et 10° (Dufour and Pillu, 2007). Le plateau tibial présente des surfaces articulaires (facettes) médiales et latérales permettant une articulation avec les condyles fémoraux correspondants. La surface articulaire médiale est ovale, de grand axe antéro-postérieur, et plus longue que la surface articulaire latérale (Figure 1.1.2-1) (Standring, 2016).

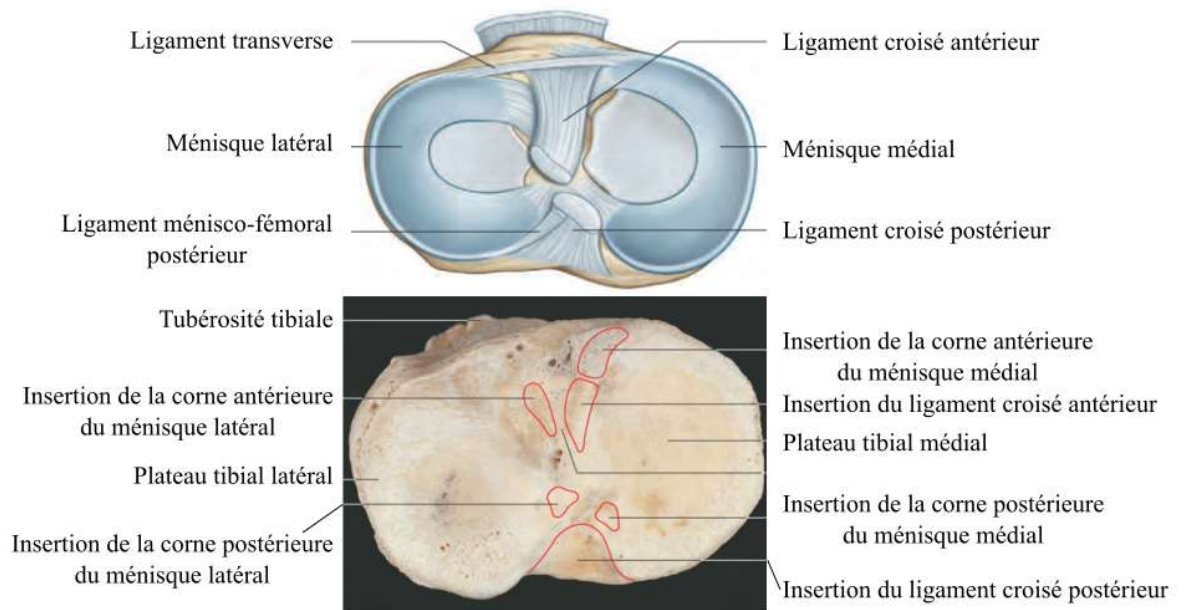


Figure 1.1.1-2. Le plateau tibial et la zone intercondylienne d'après Standring (éditeur), *Gray's Anatomy* (2016).

Au centre du plateau tibial se trouve la zone intercondylienne. A sa partie antéro-médiale, une dépression marque le site de fixation de la corne antérieure du ménisque médial : la surface pré-spinale du plateau tibial. Derrière, une zone lisse reçoit le ligament croisé antérieur (LCA). La partie postérieure de la zone intercondylienne reçoit l'insertion de la corne postérieure du ménisque latéral et fournit l'origine du ligament croisé postérieur (LCP). Cette partie postérieure du plateau tibial s'incline en bas et en arrière, et se termine par une crête à laquelle la capsule articulaire du genou est attachée (Standring, 2016).

Il est à noter que la congruence entre le tibia et le fémur est faible, mais elle est améliorée par les ménisques (leur description sera faite dans la partie 1.1.2.3). Ce sont des pièces intermédiaires, permettant de faire le lien entre les condyles fémoraux convexes et le plateau tibial dont les facettes sont peu profondes.

1.1.1.3 La biomécanique du genou

Le complexe articulaire du genou doit assurer la fonction de "portance", par la transmission de la charge gravitaire du corps au sol, par l'intermédiaire du pied et du segment jambier (Dufour and Pillu, 2007). Son rôle est de permettre une locomotion assurant stabilité et économie musculaire pour s'accommoder aux différents types de terrains rencontrés. Il permet

également de transmettre, d'absorber, et de restituer les forces induites par le squelette au sol, et vice versa, pendant les activités de la vie quotidienne).

L'articulation fémoro-tibiale est de type charnière avec 6 degrés de liberté : 3 rotations et 3 translations (glissements représentant des déplacements rectilignes) (Figure 3). Les 3 rotations s'effectuent autour de l'axe transversal (flexion/extension), de l'axe antéro-postérieur (varus/valgus), et de l'axe longitudinal (rotation médiale / rotation latérale). Elles sont accompagnées par des translations circonférentielles : la rotation et la translation se font dans le même sens ; ou par des roulements-glissements : la rotation et la translation se font en sens contraire.

Le mouvement majeur est la flexion/extension (Figure 1.1.1-3). Les mouvements de flexion et d'extension se réalisent dans le plan sagittal selon un axe de rotation transversal passant par le centre des 2 condyles. Son axe de rotation est en réalité un ensemble de centres instantanés de rotations, proche de l'intersection du plan frontal avec le plan transversal passant par le centre de l'articulation. Les centres instantanés de rotations s'expliquent par le rayon de courbure des condyles qui décroît d'avant en arrière et par la différence des rayons de courbure entre les condyles fémoraux. Cette particularité anatomique explique également la rotation médiale automatique lors de la flexion (Dufour and Pillu, 2007). De ce fait, le mouvement de flexion/extension est accompagné de glissements et de roulements. En chaîne cinétique ouverte (CCO), qui est définie comme une modalité de mouvement comprenant une combinaison successive d'articulations dans laquelle le segment terminal est libre de tout mouvement, le fémur reste fixe et le tibia est mobile, et la flexion du genou s'accompagne alors d'un glissement circonférentiel. Inversement, en chaîne cinétique fermée (CCF), c'est le segment terminal qui transmet la force à un élément fixe (le plus souvent le sol). Ainsi, lors de la flexion/extension du genou, le tibia est le point fixe et le mouvement s'accompagne d'un roulement-glissement.

Dans le plan transversal, les rotations ne sont possibles qu'à partir d'une légère flexion. La rotation médiale porte la tubérosité tibiale en dedans et la rotation latérale en dehors de l'axe jambier passant par le centre de l'articulation fémoro-tibiale. Entre 60° et 90° de flexion de genou, la rotation médiale est de 30° et la rotation latérale est de 45° (Dufour and Pillu, 2007). Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure de l'extension du genou et sont nulles en extension totale. Il est à noter qu'il se réalise une rotation médiale automatique, d'environ 20°, lors de la flexion de genou, à cause principalement de la forme des condyles fémoraux (Dufour and Pillu, 2007).

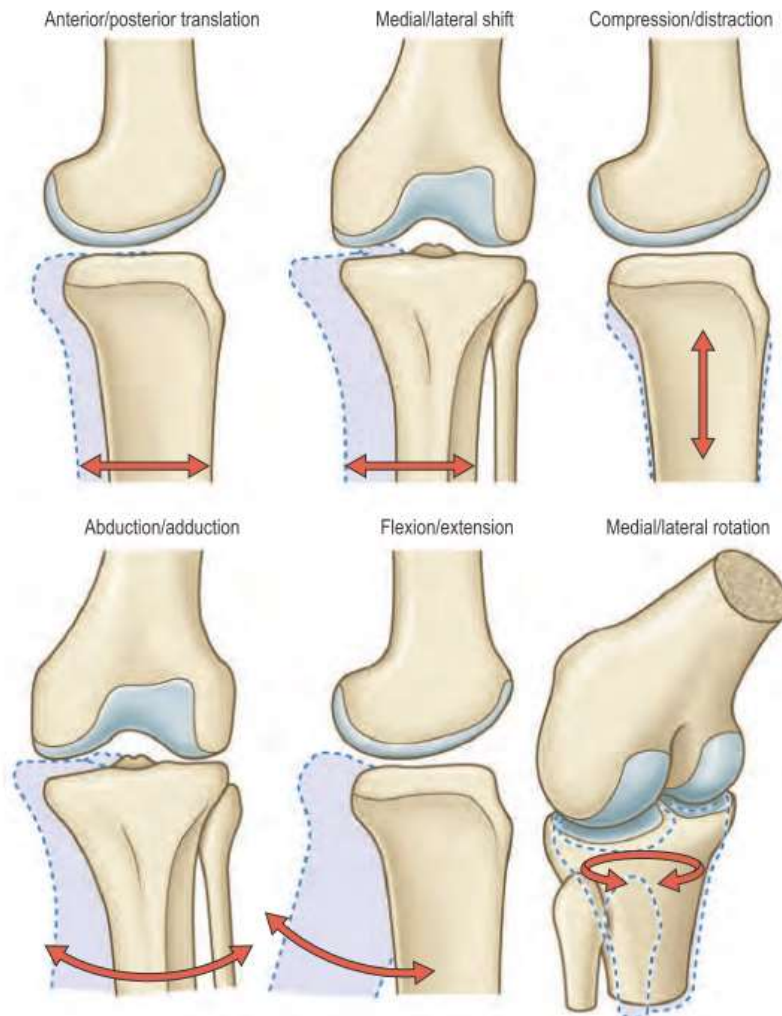


Figure 1.1.1-3. Les mouvements de l'articulation du genou dans les 3 dimensions, en fonction des 6 degrés de liberté. Le mouvement de flexion et d'extension, et les rotations (médiale et latérale qui apparaissent seulement lorsque le genou n'est pas en extension) sont les mouvements majeurs de l'articulation du genou. D'après Standring (éditeur), *Gray's Anatomy* (2016).

Les mouvements de varus et de valgus de genou n'existent pas en extension pour un genou normal. Ils existent lors de la flexion mais sont de faible amplitude. Ce sont les bâillements médiaux et latéraux que l'on teste à 20° de flexion de genou. S'ils sont de grande amplitude et combinés avec la flexion/extension et les rotations, ces mouvements sont responsables de lésions ménisco-ligamentaires.

La faible congruence et la grande mobilité du complexe articulaire du genou sont compensées par des moyens passifs et actifs de stabilisation que nous allons détailler.

1.1.2 LES MOYENS PASSIFS DE LA STABILITE ARTICULAIRE

1.1.2.1 La capsule articulaire et la membrane synoviale

La capsule articulaire est commune entre les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale. C'est un manchon fibreux qui s'insère sur le fémur, la patella et le tibia, et enveloppe le paquet adipeux infra-patellaire. Il comprend deux plans de fibres, un plan superficiel, et un plan profond. Sur le tibia, la capsule articulaire s'insère en dessous de la surface articulaire, sur l'extrémité supérieure du tibia (de 4 à 14 mm) (Noyes and Barber-Westin, 2017). La capsule articulaire possède des connexions avec les ménisques médiaux et latéraux. Au niveau de l'extrémité inférieure du fémur, son insertion se fait au-dessus du cartilage fémoral et forme en avant un cul-de-sac sous-quadricipital.

La membrane synoviale tapisse la face profonde de la capsule et présente de nombreux replis. Ainsi, elle entoure et recouvre le LCA et le LCP qui sont donc extra-synoviaux, mais reste intra-articulaires. En effet, le LCA et le LCP se situent entre les plans profonds et périphériques de la capsule articulaire (Figure 5). Après la reconstruction chirurgicale du LCA, cette membrane synoviale va former un manchon autour de la greffe, permettant le processus de ligamentisation (Scheffler *et al.*, 2008).

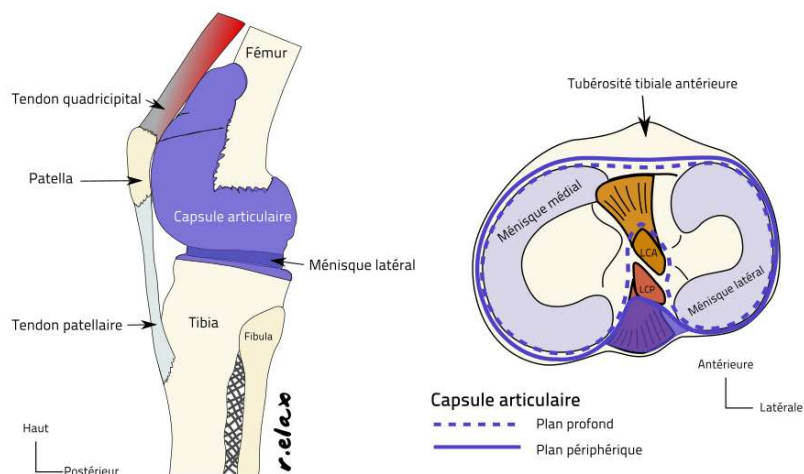


Figure 1.1.2-1. La capsule articulaire de l'articulation du genou. LCA : ligament croisé antérieur, LCP : ligament croisé postérieur. Modifié d'après Standring (éditeur), *Gray's Anatomy* (2016) et Noyes et Barber-Westin 2017.

Les point d'angle postéro-latéral (PAPL) (Ankri *et al.*, 2016) et postéro-médial (PAPM) (Sims and Jacobson, 2004) correspondent aux renforcements capsulaires postéro-latérales et postéro-médiales du genou. Ils sont composés à la fois de structures musculo-tendineuses, de renforcement des coques

condyliennes, des cornes postérieures des ménisques, et des ligaments (ligament poplitéo-fibulaire et ligament collatéral latéral pour le PAPL, et ligament oblique postérieur, ligament ménisco-tibial et ligament poplité oblique pour le PAPM).

1.1.2.2 Les ligaments

La double articulation fémoro-tibiale est principalement une articulation de flexion/extension, et les ligaments collatéraux guident ce mouvement majeur. Ils sont extra-articulaires. Le ligament collatéral médial (LCM) a des liens étroits avec la capsule de par ses insertions méniscales. Au contraire, le ligament collatéral latéral (LCL) est tendu du fémur à la tête de la fibula, formant un espace entre lui et le mur méniscal latéral. En intra-articulaire se trouvent des ligaments croisés, ainsi nommés pour leur direction l'un par rapport à l'autre : le ligament croisé antérieur (LCA) et le ligament croisé postérieur (LCP) (Figure 1.1.2-2).

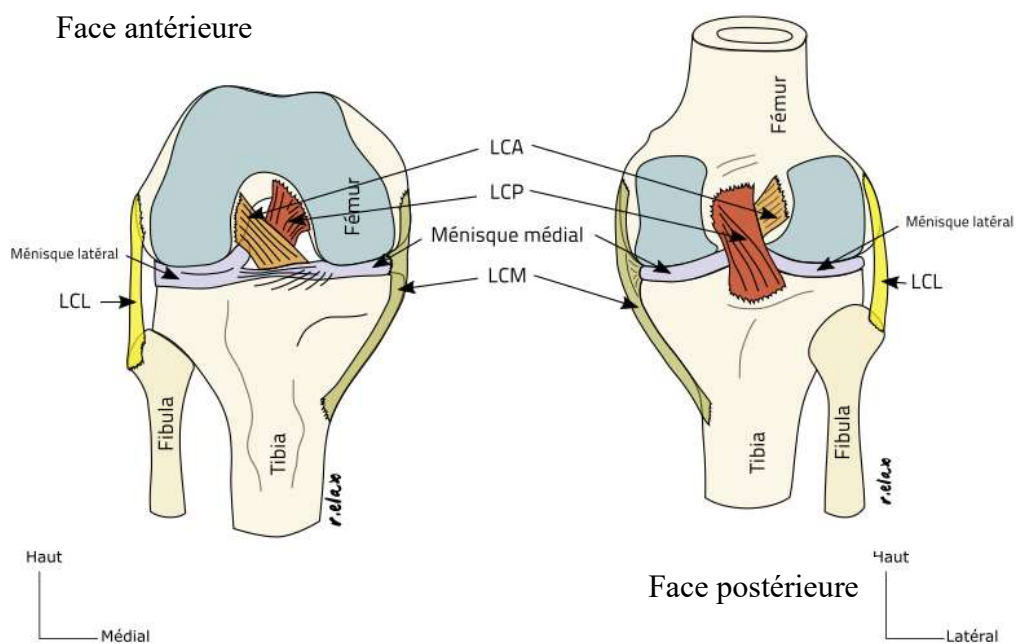


Figure 1.1.2-2. L'articulation du genou et ces ligaments. LCA : ligament croisé antérieur ; LCP : ligament croisé postérieur ; LCM : ligament collatéral médial ; LCL : ligament collatéral latéral.

Le ligament collatéral latéral (LCL) représente un cordon solide, arrondi, bien isolé, oblique en bas et en arrière. Il naît du fémur sur l'épicondyle latéral, en dessous de l'insertion du gastrocnémien latéral, au-dessus du tendon du muscle poplité, et se termine sur l'extrémité supérieure de la fibula (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Le ligament collatéral médial (LCM) est une bandelette aplatie, mal isolée du plan capsulaire, près de deux fois plus long que le LCL. Il se compose de 2 plans, superficiel et profond, et de 3 faisceaux principaux :

- Le faisceau fémoro-tibial se trouve dans le plan superficiel. Il prend origine sur l'épicondyle médial du fémur, dans une dépression de 4,8 mm en postérieur et 3,2 mm en proximal du centre de l'épicondyle médial (LaPrade et *al.*, 2007; Noyes and Barber-Westin, 2017). Il se dirige en bas et légèrement en avant, et s'insère en arrière de la patte d'oie.

Il existe également une partie profonde du LCM qui se compose de 2 faisceaux :

- Le faisceau fémoro-méniscal ;
- Le faisceau tibio-méniscal.

Ils se fixent au ménisque médial en s'y confondant avec la capsule (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Le ligament croisé antérieur (LCA) (Figure 1.1.2-3) naît sur la surface pré-spinale du plateau tibial, entre les insertions des freins antérieurs des deux ménisques. Il se porte en arrière, en dehors et en haut, et se termine sur la face médiale du condyle latéral du fémur. Il est constitué de fibres de directions et de longueurs différentes, qui forment un ruban composé de 2 faisceaux (Śmigielski et *al.*, 2016) : le faisceau antéro-médial et le faisceau postéro-latéral.

Le rôle du LCA est de stabiliser le genou lors de différentes activités comme lors de l'initiation d'un saut, d'appui en pivot, de changement de direction ou lors de la réception de saut. Il est responsable de la limitation de la translation antérieure du tibia et de la rotation médiale du tibia. Son rôle et sa description sont détaillés dans le paragraphe 1.1.4.

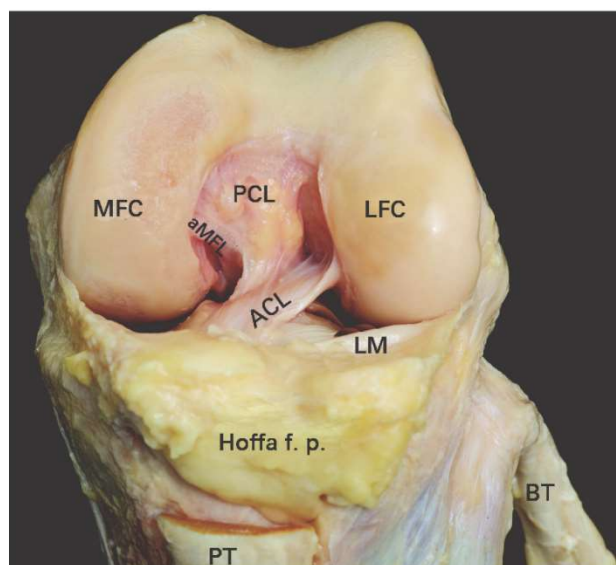


Figure 1.1.2-3. *Vue antérieure cadavérique des articulations fémoro-tibiales (médiale et latérale) et des ligaments croisés après ablation de la patella, tirée de Smigielski et al. (2016). MFC : condyle fémoral médial, LFC : condyle fémoral latéral, ACL : ligament croisé antérieur, PCL: ligament croisé postérieur, LM: ménisque latéral, Hoffa f.p. : paquet adipeux infra-patellaire, BT : tendon du biceps fémoral, PT : tendon patellaire, aMFL : ligament ménisco-fémoral antérieur.*

Le ligament croisé postérieur (LCP) est le principal frein du tiroir postérieur, quelle que soit l'amplitude articulaire. Le LCP est un ligament large, avec des insertions en éventail. La longueur moyenne du LCP est de 38 mm, et sa largeur moyenne 13 mm. Les sites d'insertions du LCP sont plus grands que ceux du LCA. L'insertion tibiale se fait dans la fosse postérieure intercondyloire, et se présente sous la forme d'un rectangle ou d'un trapèze (Noyes and Barber-Westin, 2017). Il se dirige en haut, en avant et en dedans, et se termine sur la face interne du condyle médial de façon très variable (Noyes and Barber-Westin, 2017).

1.1.2.3 Les ménisques

Ce sont des fibrocartilages qui augmentent la profondeur anatomiquement très faible des plateaux tibiaux.

Ils sont triangulaires à la coupe et enroulés sur eux-mêmes. Le ménisque latéral est très fermé, en forme de "O", alors que le médial est plus ouvert, en forme de "C". Chacun présente une face inférieure plane reposant sur le plateau tibial, une face externe verticale en rapport avec la capsule articulaire, appelée également mur méniscal, une face supérieure concave répondant au condyle fémoral, et un bord interne tranchant très mince. Les deux cornes

(antérieures et postérieures) des ménisques sont fixées par des ligaments méniscaux sur le tibia. Les deux ménisques sont unis également entre eux en avant par le ligament transverse du genou.

Leur fonction est double : *i*) ils assurent une bonne congruence articulaire entre le fémur et le tibia, permettant une stabilisation du genou, et *ii*) ils ont également un rôle d'amortisseur, permettant d'absorber, en partie, les contraintes mécaniques subies par l'articulation afin de mieux les répartir.

1.1.3 LES MOYENS ACTIFS DE LA STABILITE ARTICULAIRE

Les muscles péri-articulaires forment le second niveau de maintien de l'articulation du genou : ils assurent la stabilité active (ou dynamique) du genou. Ils sont présentés ci-dessous en fonction de leurs localisations.

En avant, dans la loge antérieure de la cuisse (Figure 1.1.3-1), se situe le **muscle quadriceps**. Il est composé de 4 chefs : 3 chefs mono-articulaires (vaste médial, vaste latéral et vaste intermédiaire) et un chef polyarticulaire (le droit fémoral). Il s'insère en proximal sur l'épine iliaque antéro-inférieure de l'os iliaque, et en distal au bord supérieur de la patella par le tendon quadricipital. Il transmet sa force jusqu'au tibia par le tendon patellaire situé entre la patella et la tubérosité tibiale antérieure (Figure 8). En CCF, cet appareil extenseur réalisé par le muscle quadriceps permet de verrouiller le genou en extension, et de contrôler la flexion de genou.

Le **muscle sartorius** fait également partie de la loge antérieure. Il s'insère en proximal sur l'épine iliaque antéro-supérieure et se termine en distal par un large tendon sur la partie supérieure de la face antéro-médiale du tibia. Ce muscle polyarticulaire intervient dans l'abduction, la flexion et la rotation latérale de hanche. Il fait partie des muscles de la patte d'oie (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Dans la loge médiale de la cuisse, le **muscle gracile** s'insère en proximal sur la face antérieure du pubis et sur le tiers médial du bord inférieur de la branche ischio-pubienne. Il se termine en distal sur le même site tibial que le sartorius et le semi-tendineux. Ce muscle polyarticulaire est adducteur et rotateur latéral de hanche, et fait partie également des muscles de la patte d'oie (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

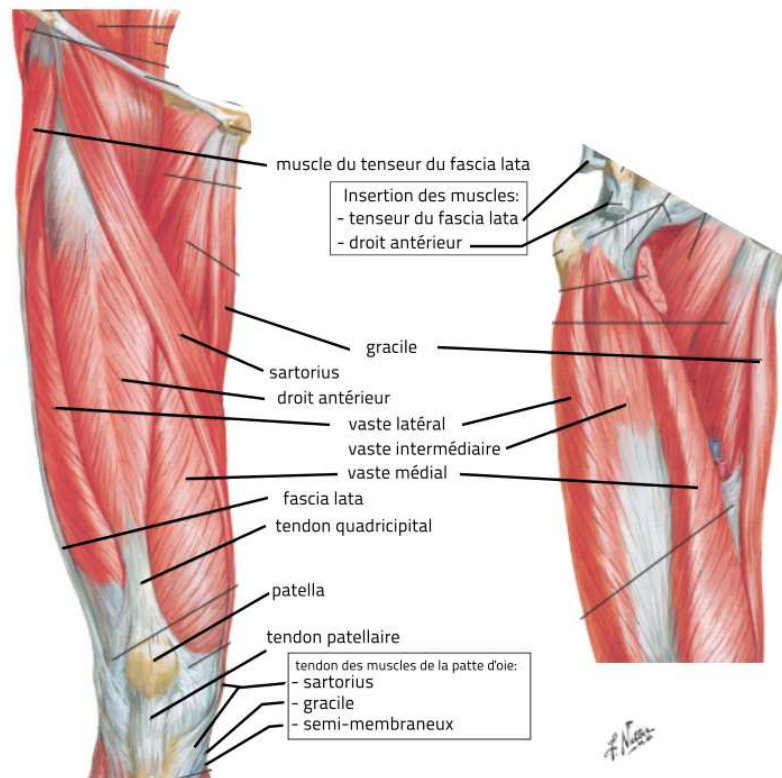


Figure 1.1.3-1. Les muscles de la face antérieure de la cuisse d'après Netter (2011).

Dans la loge postérieure de la cuisse (Figure 1.1.3-2), les muscles ischio-jambiers sont au nombre de 3. Ils s'insèrent tous les 3 en proximal sur la tubérosité ischiatique. Le **muscle semi-tendineux**, complète l'ensemble des muscles de la patte d'oie. Le muscle **semi-membraneux** se termine en distal sur la partie supérieure de la face postéro-médiale (faisceau direct) et médiale (faisceau réfléchi) du tibia, mais également sur le condyle latéral du fémur (ligament poplité oblique). Comme le semi-tendineux, il est fléchisseur et rotateur médial du genou. Le **muscle biceps fémoral** est composé de deux chefs : le chef long s'insère en proximal sur la tubérosité ischiatique, et le chef court naît sur la moitié inférieure de la lèvre distale de la ligne âpre du fémur. Tous deux se terminent en distal sur la tête de la fibula et par des extensions sur la partie supérieure de la face postéro-latérale du tibia. Son action est la flexion et la rotation latérale de genou (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

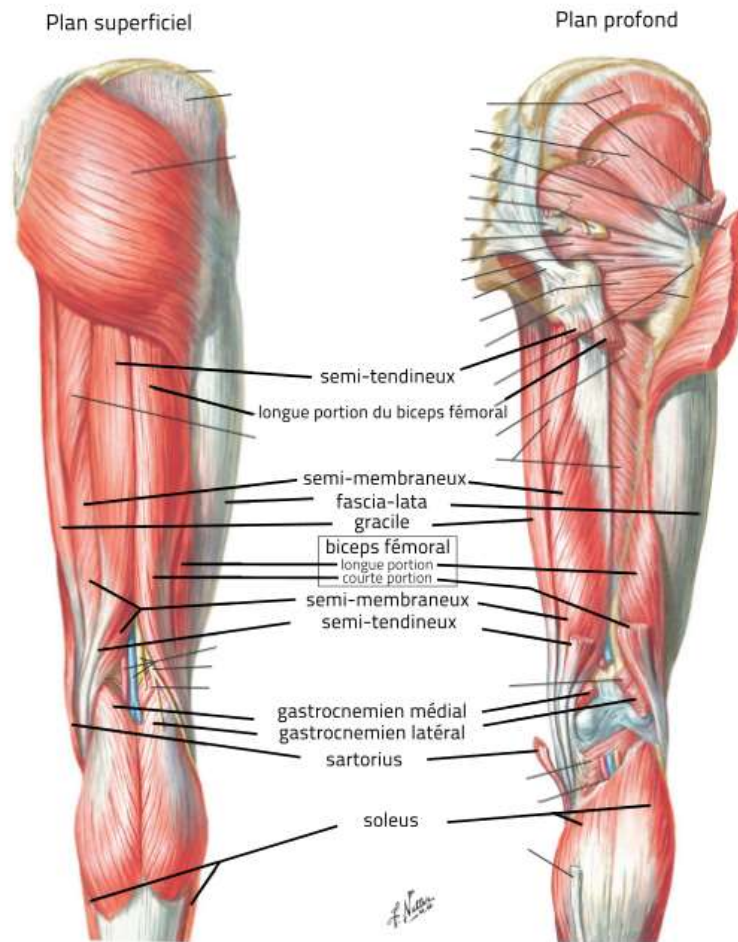


Figure 1.1.3-2. Les muscles de la face postérieure de la cuisse d'après Netter (2011).

Sur la face latérale de la cuisse se trouve une bande fibreuse nommée le fascia lata. Il s'insère en proximal sur le tubercule de la crête iliaque et se termine en distal sur la partie supérieure de la face antéro-latérale du tibia. Il limite également le glissement antérieur du tibia sous le fémur par une expansion sur la partie inférieure de la face antérieure du fémur. Le **muscle tenseur du fascia lata**, situé sur la partie antéro-supérieure de la région de la cuisse, se termine sur le quart supérieur du bord antérieur du fascia lata et permet une mise en tension de ce dernier. Avec le muscle biceps fémoral, ils forment le hauban externe du genou. Ils ont une action anti-varisante et contrôlent la rotation médiale du tibia sous le fémur (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Les **muscles gracile, semi-tendineux et sartorius** qui forment la patte d'oie, sont un hauban médial de l'articulation du genou. Ils ont une action anti-valgisante, contrôlent la

rotation latérale du tibia sous le fémur et sont fléchisseurs du genou lorsqu'il est déverrouillé (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Dans la loge postérieure de la jambe, les chefs latéral et médial du **muscle gastrocnémien** ainsi que le tendon et les expansions du **semi-membraneux**, renforcent la capsule postérieure de l'articulation du genou. Le muscle gastrocnémien s'insère en proximal sur la face postérieure de la partie distale du fémur (au-dessus des condyles fémoraux), et se termine en distale par le tendon calcanéen sur la face postérieure du calcanéum (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Le **muscle poplité** et la **portion courte du muscle biceps fémoral** sont des muscles courts profonds et mono-articulaires. Ils ont un rôle de stabilisation et proprioceptif. Le muscle poplité s'insère en proximal sur la fossette poplitée du fémur, au-dessus du condyle latéral. Il a un trajet oblique vers le bas et en dehors. Sa terminaison distale se fait sur le tibia, au-dessus de la crête du soléaire (Noyes and Barber-Westin, 2017; Standring, 2016).

Ainsi les moyens de stabilisation actifs, travaillant en synergie avec les moyens de stabilisation passifs, permettent une mobilité et une stabilité essentielles du complexe articulaire du genou lors de la locomotion, mais également lors des activités plus contraignantes comme les sauts verticaux et horizontaux, ou encore la course à pied. L'élément principal de stabilisation de la flexion est l'appareil extenseur, aidé par les ischio-jambiers, le triceps sural et les muscles de la patte d'oie. La stabilisation de la rotation médiale et latérale est plutôt dévolue aux moyens passifs (LCA et LCP, ménisques), mais se fait en synergie. Ainsi, lors de la rupture du principal élément passif de stabilisation rotatoire de l'articulation du genou, le LCA, l'équilibre entre moyens actifs et passifs est bouleversé, entraînant des accidents d'instabilité ("*give away*"), voire secondairement des lésions méniscales et cartilagineuses. Nous allons développer la physiologie et pathologie du LCA dans les chapitres suivants.

1.2 ANATOMIE ET BIOMECHANIQUE DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

1.2.1 L'ANATOMIE DU LCA

Le LCA s'insère au niveau du tibia sur la zone intercondylienne antérieure et se termine sur la face postéro-médiale du condyle fémoral latéral. Du fait de son insertion tibiale, il est oblique, orienté de dedans vers dehors et d'arrière en avant. Le ligament mesure environ 38 mm de longueur pour 10 mm de largeur (Micheo et *al.*, 2010), bien que ces mesures varient en fonction de l'amplitude articulaire (augmentation de longueur en fin de flexion et d'extension) et de situation dynamique telle que l'activité sportive (augmentation lors de la course à pied ou de la marche) (Tashiro et *al.*, 2017).

Le LCA est constitué de fibres de directions et de longueurs différentes. Deux faisceaux distincts sont décrits en fonction de leur emplacement relatif d'insertion sur le tibia : le faisceau s'insérant à la partie antéro-médiale du tibia (le faisceau antéro-médial (AM)), et l'autre sur la partie postéro-latérale du tibia (le faisceau postéro-latéral (PL)).

La vascularisation du LCA est assurée par l'artère géniculée moyenne et inférieure, naissant de l'artère poplitée (Markatos et *al.*, 2013).

L'innervation du LCA est assurée par le nerf tibial qui fournit au système nerveux central des informations afférentes sur la position de l'articulation (Proffen and Murray, 2013). En effet, le LCA contient des terminaisons libres ainsi que des mécanorécepteurs (corpuscules de Ruffini et de Pacini) qui jouent un rôle important dans la proprioception. Les terminaisons nerveuses libres sont capables de détecter les étirements (mécanorécepteurs) ou la douleur (nocicepteurs). Les corpuscules de Ruffini sont des mécanorécepteurs et agissent comme des récepteurs à l'étirement (leur adaptation est définie comme « lente), tandis que les corpuscules de Pacini s'adaptent rapidement et sont sensibles à la vitesse et aux accélérations (Proffen and Murray, 2013). Dans les modèles animaux, il a été démontré que les mécanorécepteurs du LCA fournissent des informations sur l'angle de l'articulation pendant le mouvement et permettent ainsi un rétrocontrôle ralentissant le mouvement du genou lorsque les limites de mouvement sont atteintes grâce aux muscles (Proffen and Murray, 2013). En effet, il a été mis en évidence que l'étirement des mécanorécepteurs du LCA stimule les muscles ischio-jambiers à travers un arc polysynaptique (Proffen and Murray, 2013). Cet exemple de retour a également été démontré chez l'humains (Dyhre-Poulsen and Krogsgaard, 2000). Les informations sensorielles

fournies par le LCA peuvent ainsi aider à la coordination de l'activité musculaire et permettre une stabilité dynamique de l'articulation du genou (Noyes and Barber-Westin, 2017).

1.2.2 LA FONCTION DU LCA

Le LCA contrôle la translation antérieure du tibia et la rotation fémoro-tibiale grâce à l'orientation spécifique de ces deux faisceaux et à leurs insertions.

Lorsque le genou est en extension complète, les deux faisceaux AM et PL sont parallèles et en tension maximale. Ils empêchent le recurvatum de genou avec les ligaments latéraux et les coques condyliennes, et participent au verrouillage passif du genou. Il est à noter qu'en extension, le faisceau PL est le plus tendu (Noyes and Barber-Westin, 2017).

Lorsque le genou effectue une flexion, les deux faisceaux se croisent et le LCA s'horizontalise. De 0° à 30° de flexion, le faisceau AM est tendu, alors que le faisceau PL se détend. C'est dans cette position (environ 20°) que se fait le test de Lachman (voir partie 1.2.3), permettant de mettre en évidence une rupture du LCA ; ce test analyse donc principalement la fonction du faisceau AM du LCA. Puis vers 60° de flexion, les 2 faisceaux se détendent, et ce sont donc les structures du plan ménisco-ligamentaire médial et postéro-latéral qui stabilisent passivement la translation antérieure.

Le LCA, associé au le LCP ont un rôle important dans les mouvements des condyles sur les plateaux tibiaux. Ils permettent la combinaison de roulement et de glissement lors de la flexion/extension, participant à la bonne fonction articulaire du genou, en synergie avec les ligaments collatéraux (LCM et LCL) répartissant de façon homogène les contraintes sur les ménisques. Le LCA a également comme rôle secondaire de limiter le valgus et le varus, dans tous les degrés de flexion de genou (Micheo et *al.*, 2010).

En cas de rupture du LCA, la biomécanique articulaire est alors modifiée, ce qui peut être la source de lésions secondaires des structures du genou (cartilage et/ou ménisques).

1.2.3 LES PROPRIETES MECANQUES DU LCA

Les propriétés mécaniques de résistance du LCA répondent aux contraintes qui lui sont imposées (Escamilla et *al.*, 2012). Différentes études ont rapporté une dégradation de ces propriétés mécaniques après une période d'inactivité ou d'immobilisation (Newton et *al.*, 1995), alors que l'activité physique semble avoir un effet bénéfique (Noyes et *al.*, 1974; Noyes and Barber-Westin, 2017).

Le LCA fournit 86% de la résistance totale à la translation antérieure du tibia sous le fémur (Butler et *al.*, 1980). Les contraintes sur le LCA sain varient en fonction des activités, allant d'aucune contrainte sur le LCA pour une contraction isométrique en CCO des ischio-jambiers ou une contraction du quadriceps à 90° de flexion, à 4,4% d'étirement du LCA pour une contraction isométrique du LCA à 15° de flexion pour un moment de force appliqué au genou de 30 N.m (mesure réalisée in vivo (Heijne et *al.*, 2004). De façon similaire, Henning et *al.* (Henning et *al.*, 1985) ont calculé in vivo l'étirement relatif comparé à un test de Lachman (le test de Lachman représente 100%) (Tableau 1.2.3-1.). La marche avec béquilles et avec un appui partiel de 50% du poids du corps entraînait un étirement de seulement 7% du test de Lachman, la marche 36%, la course à pied à vitesse faible 89%, alors que la course sur un tapis en descente représentait 125% (Tableau 1.2.3-1.).

À partir de 60° de flexion jusqu'à l'extension complète, la force exercée par le quadriceps en chaîne ouverte engendre une translation antérieure du tibia sous le fémur, mettant en tension le LCA. Une co-contraction des muscles ischio-jambiers diminue cette tension, quelle qu'en soit l'amplitude. Zavatsky et *al.* ont également montré que les forces de translation tibiale lors du travail du quadriceps dépendaient de l'angle de flexion du genou, de la résistance appliquée, et de la longueur du bras de levier (Zavatsky et *al.*, 1994). Ainsi, la mise en tension du LCA était nulle lorsque la résistance était appliquée à moins de 10 cm du centre articulaire du genou (Zavatsky et *al.*, 1994).

Les contraintes sur le LCA in vivo ont été également étudiées lors de la marche, de la course à pied, et lors de différentes modalités de réalisation de sauts verticaux (Roldán et *al.*, 2017). Les contraintes sur le LCA mesurées à la marche étaient d'environ 0,7 fois le poids du corps (0,70 BW, ou body weight), alors qu'à la course à pied cette valeur diminuait à 0,62 BW. L'activité de course à pied n'était donc pas une activité contraignante pour le LCA et pourrait s'expliquer par la diminution des forces de translation tibiale lorsqu'une force de compression fémoro-tibiale était exercée (Henning et *al.*, 1985; Lutz et *al.*, 1993). De plus, la co-contraction

du quadriceps et des ischio-jambiers, observée en chaîne cinétique fermée, permettrait de réduire également les forces de translation tibiale (Heijne et al., 2004). Cependant, lors de la course à pied en descente, les contraintes exercées sur le LCA étaient importantes, 25% de plus qu'un test de Lachman à 355 N (Henning et al., 1985).

Tableau 1.2.3-1. Contraintes subies par le LCA lors de différentes activités mesurées in vivo (Heijne et al., 2004; Henning et al., 1985)

Valeur maximum de déformation du LCA pendant des exercices de rééducation	Elongation relative par rapport à la longueur de repos du LCA (%)	Elongation relative par rapport au test de Lachman (%)
Courir sur un tapis en descente		125*
Contraction isométrique du quadriceps à 22° de flexion avec une botte de 9 kg		62-121*
Contraction isométrique du quadriceps à 15° de flexion (pour 30 N.m \$)	4,4	119‡
Contraction isométrique du quadriceps en extension complète avec une botte de 9 kg		87-107*
Réalisation de squat avec résistance	4,0	108‡
Flexion et Extension active du genou avec une charge de 45N au niveau du pied	3,8	103‡
Test de Lachman (force de translation exercée de 150N à 30° de flexion)	3,7	100‡
Réalisation de squat	3,6	97‡
Course à pied à faible vitesse (jogging)		89*
Flexion et Extension active du genou sans charge	2,8	76‡
Co-contraction du quadriceps et des ischio-jambiers à 15° de Flexion	2,8	76‡
Contraction isométrique du quadriceps à 30° de flexion (pour 30 N.m \$)	2,7	73‡
Montée d'escaliers	2,7	73‡
Course à pied sur un tapis à 8 km/h		62-64*
Contraction isométrique du quadriceps à 22° de flexion avec une botte de 9 kg		50-62*
Course à pied sur un tapis à 7,2 km/h (Femmes)		61*
Appui total avec une flexion de genou de 20°	2,1	57‡
Test du tiroir (traction de 150 N à 90° de flexion de genou)	1,8	49‡
Cycloergomètre ou vélo d'appartement	1,7	46‡
Test du tiroir (traction de 150 N à 90° de flexion de genou)		39*
Marche		36*
Corde à sauter (2 pieds)		21*
Corde à sauter (1 pied)		21*
Squat sur une jambe		21*
Contraction isométrique des ischio-jambiers à 30° de flexion de genou	0,6	12‡
Ecrase coussin		15*
Co-contraction du quadriceps et des ischio-jambiers à 30° de flexion	0,4	11‡
Marche avec des béquilles à 50% du poids du corps		7*
Flexion et extension passive du genou	0,1	3‡
Contraction isométrique du quadriceps à 60° de flexion (pour 30 N.m \$)	0	0‡
Flexion	0	0‡
Co-contraction du quadriceps et des ischio-jambiers à 60° de Flexion	0	0‡
Co-contraction du quadriceps et des ischio-jambiers à 90° de Flexion	0	0‡
Contraction isométrique des ischio-jambiers à 30°, 60° et 90° de F° (pour -10 N.m \$)	0	0‡

\$ Moment de force d'extension de genou réalisé en chaîne cinétique ouverte.

D'après Henning et al. (Am JSM 1985) * (Lachman réalisé avec 355N)

Valeurs calculées en fonction du Test de Lachman (150N) de l'étude de Heijne et al. (MSSE 2004) ‡

Lors de la rééducation, les exercices proposés doivent prendre en compte les contraintes induites sur la plastie du LCA. En effet, l'incorporation de la greffe dans les tunnels (tibial et fémoral) se fait entre la 8^{ème} et la 12^{ème} semaine postopératoire (Rodeo et *al.*, 1993). Dans cette période, il est donc fortement déconseillé de proposer des exercices de contraction concentrique et isométrique du quadriceps, dans les amplitudes 0-30° en CCO et avec charge additionnelle fixée à l'extrémité distale du membre inférieur, car ces dernières entraînent des contraintes importantes sur le LCA. Les exercices en CCF, et les exercices de contraction des ischio-jambiers sont donc à favoriser, car en limitant la contrainte sur le LCA, ils permettent de protéger la greffe.

De nombreuses études ont aussi rapporté des propriétés mécaniques, structurelles et géométriques du LCA, différentes entre l'homme et la femme. Le LCA des femmes possédait une résistance plus faible à la déformation que celui des hommes (Hashemi et *al.*, 2008). Cela pourrait être expliqué par l'expression génique du collagène du LCA et de la matrice responsable du remodelage et du renouvellement des éléments structurels du LCA (Slauterbeck et *al.*, 2006). Il existait également des différences dans l'ultrastructure (densité de fibres et diamètres plus faibles) (Hashemi et *al.*, 2008), mais aussi au niveau anatomique avec une longueur du LCA et une échancrure fémorale plus faible chez les femmes (Chandrashekar et *al.*, 2005, 2006). Toutes ces disparités pourraient également expliquer une différence dans la résistance à la rupture du LCA : de 1266 ±527 N) chez la femme et de 1818 ±699 N) chez l'homme (Chandrashekar et *al.*, 2006). Cette résistance semblait être plus importante en fin de maturité osseuse, puis diminuait avec l'âge (Noyes and Grood, 1976; Woo et *al.*, 1990). Tous ces éléments nous permettent de mieux comprendre les écarts observés dans le recueil de blessures dans les différentes populations, entre les hommes et les femmes, et en fonction de l'âge et du sport pratiqué.

1.3 LA RUPTURE DU LCA

1.3.1 L'ÉPIDÉMIOLOGIE DE LA RUPTURE DU LCA

1.3.1.1 L'épidémiologie de la première rupture du LCA

Il a été rapporté deux ruptures du LCA par heure dans les pays scandinaves, et une rupture de LCA par heure en Allemagne et en Suisse (Murray et *al.*, 2013) !

Il a été estimé une incidence de 60 à 78 ruptures du LCA pour 100 000 personnes dans la population générale (Nordenvall et *al.*, 2012; Parkkari et *al.*, 2008), et une incidence annuelle en moyenne entre 0,03 et 0,04% pour la plupart des pays ayant un registre des blessures (Moses et *al.*, 2012).

Chez les sportifs, l'incidence des ruptures du LCA est plus élevée chez les femmes que chez les hommes (respectivement 1,5 et 0,9 /10 000 expositions, $p < 0,01$) (Montalvo et *al.*, 2018), ainsi que chez les sportifs amateurs par rapport aux sportifs professionnels (ratio de l'incidence 2,1 ; $p < 0,01$), toujours en défaveur des femmes (Montalvo et *al.*, 2018).

L'incidence était également différente en fonction du sport pratiqué : chez les hommes pratiquant un sport universitaire aux Etats-Unis, l'incidence était la plus faible au baseball (0,02 blessures pour 10 000 expositions), et la plus importante au football américain (entre 0,18 et 0,33/10 000 expositions). Pour les femmes, l'incidence la plus faible était au Hockey sur glace (0,03/10 000 expositions), et la plus haute au football (0,28/10 000 expositions) et en gymnastique (0,33 / 10 000 expositions) (Hootman et *al.*, 2007). Les sports collectifs les plus à risques de rupture du LCA étaient le basketball, le football, le football américain, le handball, et le rugby (entre 0,15% et 3,67%) (Moses et *al.*, 2012). Enfin, il a été rapporté un risque plus grand de rupture en compétition que lors des entraînements (taux de rupture du LCA 20 fois plus important : 0,240 vs. 0,017 pour 1000h) (Walden et *al.*, 2016).

Il est à noter que le ski alpin est également une activité à risque de blessure du LCA, avec toujours un risque augmenté chez les skieurs de haut niveau (Prodromos et *al.*, 2007).

Il est important de noter que la rupture du LCA était fréquemment associée à des lésions méniscales (de 30 à 75%) et à des lésions cartilagineuses (25-29%) (Årøen et *al.*, 2004; Myklebust and Bahr, 2005).

En conclusion, les jeunes sportifs pratiquant un sport pivot/contact en compétition représentent la population la plus à risque de rupture du LCA.

1.3.1.2 Épidémiologie de la deuxième rupture du LCA

Une nouvelle rupture du LCA peut survenir après reconstruction du LCA, le plus souvent, elle a été rapportée dans les 12 mois qui suivaient la reconstruction chirurgicale du LCA (Murray *et al.*, 2013).

L'incidence des ruptures de reconstruction du LCA variait de 3 à 5% deux ans après la chirurgie (Barber-Westin and Noyes, 2011a; Frobell *et al.*, 2010; Thomeé *et al.*, 2011; Wright *et al.*, 2007), et de 9 à 12% entre 8 et 13 ans après la chirurgie (Drogset and Grøntvedt, 2002; Kessler *et al.*, 2008; Salmon *et al.*, 2006). Salmon *et al.* rapportaient que 13 ans après la reconstruction chirurgicale du LCA, 34% des patients avaient présenté une re-rupture de la greffe ou une rupture du LCA controlatéral (Salmon *et al.*, 2006). En effet, le risque de rupture du LCA controlatéral était très fréquent, et estimé entre 4,4% et 9,0% (Sato *et al.*, 2015; Webster *et al.*, 2014b).

L'incidence dépendait également de la décision de retour au sport ou non. En effet, 30% des jeunes patients qui retournaient au sport en compétition après une chirurgie du LCA, risquaient un deuxième épisode de rupture du LCA (re-rupture ou rupture du côté controlatéral) dans les 2 ans qui suivaient la reconstruction chirurgicale du LCA (Paterno *et al.*, 2014). Cela se traduisait pour ces jeunes patients par un risque 15 fois plus élevé de subir une nouvelle rupture du LCA qu'un sportif sans antécédent médical de blessure du genou (Nagelli and Hewett, 2016; Paterno *et al.*, 2012).

1.3.2 LES MOUVEMENTS LESIONNELS

Il a été rapporté que la rupture du LCA se réalisait dans 80% des cas lors d'un traumatisme sans contact (Figure 1.3.2-1) (Murray *et al.*, 2013), lors de réceptions, des arrêts brusques ou des changements de direction rapides ("cutting") comme réalisés dans les sports pivot/contact (Murray *et al.*, 2013; Renstrom *et al.*, 2008). Cela pouvait s'expliquer par l'association de mouvements de décélérations et d'accélération, accompagnés par une contraction excessive du quadriceps et une diminution de la co-contraction des ischio-jambiers avec une amplitude de genou proche de l'extension complète (Chappell *et al.*, 2007; Withrow *et al.*, 2006). En effet, les contraintes sur le LCA ont été rapportées comme étant majorées lors de la contraction du quadriceps combinée à une rotation médiale de genou, un valgus combiné à une rotation médiale de genou, ou un valgus excessif pendant une mise en charge importante de l'articulation (Logerstedt, 2010). La rotation latérale associée à un valgus entraînerait une impaction du LCA susceptible également de rompre le LCA (Fung and Zhang, 2003).

Tous ces éléments doivent être pris en compte tout au long de la rééducation afin de limiter de nouvelles blessures du LCA et préparer le genou à la reprise du sport.

Tableau 1.3.2-1. Mouvements lésionnels avec ou sans contact de la rupture du ligament croisé antérieur et leur fréquence (Murray et al., 2013).

Avec contact		20%
Pressing		
Reprise d'appui		80%
Réception		

1.3.3 LE DIAGNOSTIC

Le diagnostic se fait essentiellement par l'interrogatoire et l'examen clinique (Logerstedt, 2010; van Eck et al., 2013). Les notions de douleur, de craquement ou de claquement (ou "pop"), d'instabilité, de gonflement immédiat ou secondaire suite à un mouvement de décélération, d'hyperextension ou de torsion sont à rechercher. Le patient décrit également très souvent une impossibilité de reprendre son activité suite au traumatisme, des épisodes d'instabilités secondaires, ou des épanchements articulaires à la suite du traumatisme (Logerstedt, 2010; van Eck et al., 2013).

Concernant les tests cliniques, on retrouve dans la littérature 3 principaux tests décrits pour analyser la fonction du LCA, et donc suspecter la rupture du LCA : le test du tiroir

antérieur, le test de Lachman et le pivot shift test (figure 1.3.3-1); auxquels s'est ajouté récemment un quatrième : le test du levier (ou lever Sign test) (sensibilité : 39%-94%, spécificité 80%-100%) (Deveci et *al.* 2015 ; Massey et *al.* 2017 ; Lichtenberg et *al.* 2018).

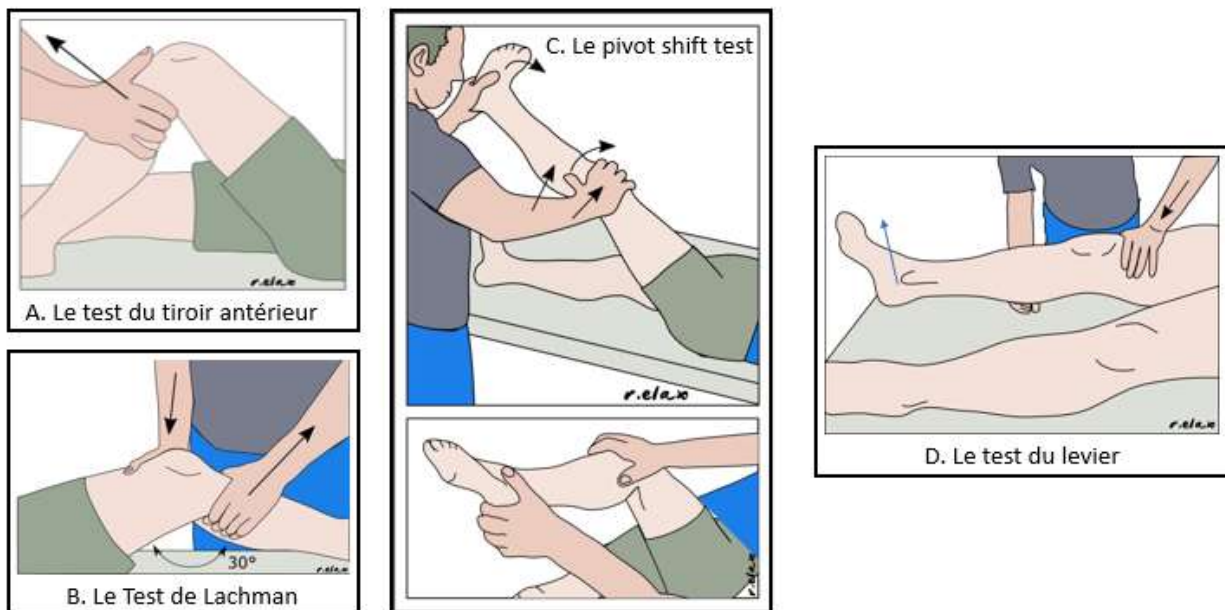


Figure 1.3.3-1. Les tests cliniques permettant de mettre en évidence une rupture du ligament croisé antérieur les plus utilisés: A : le test du tiroir antérieur ; B : Le test de Lachman ; C : Le pivot shift test ; D : le test du levier.

Des signes radiologiques permettent également d'aider au diagnostic, comme la fracture de Second observée à la radio (Segond, 1879). L'IRM permettra de confirmer la rupture, d'objectiver le caractère aigu ou non de la rupture (œdème osseux présent ou non), et de mettre en évidence des lésions associées potentielles (lésion d'autres ligaments, d'éléments capsulaires, des ménisques, du cartilage) (HAS, 2008b).

Enfin, la laxité antérieure peut être mesurée de façon objective (KT100-KT2000 ou GNRB) (Collette et *al.*, 2012; Robert et *al.*, 2009; Vauhnik et *al.*, 2014). Cette translation est mesurée en mm et comparativement au côté opposé. Cela permet d'objectiver la déficience du LCA pour contrôler la translation tibiale.

La combinaison de ces différents éléments de l'interrogatoire, de l'examen clinique et des éventuels examens paracliniques permet d'exclure ou de diagnostiquer la rupture du LCA (Décary et *al.*, 2018).

1.4 LA PRISE EN CHARGE THERAPEUTIQUE DE LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

1.4.1 LA PRISE EN CHARGE DE LA PHASE AIGUË APRES RUPTURE DU LCA

Après la rupture du LCA, une prise en charge de la douleur et de l'épanchement est proposée : traitement médical pour la douleur, conseil de déclive et d'application de froid, mise en décharge relative de l'articulation avec prescription de béquilles et d'une attelle en fonction de l'impotence fonctionnelle. Puis une prise en charge rééducative est alors proposée (Logerstedt, 2010).

L'objectif principal de la rééducation est de guider la restauration des capacités fonctionnelles du genou, d'accompagner la reprise des activités de la vie quotidienne et professionnelle, et de minimiser le risque de lésions secondaires pouvant toucher d'autres structures du genou, comme des lésions méniscales et/ou cartilagineuses (Micheo et *al.*, 2010). Ainsi, après la rupture du LCA, une prise en charge rééducative rapide est préférable (Francis et *al.*, 2001). Elle a pour objectif de diminuer les conséquences du traumatisme, se manifestant par une phase inflammatoire aiguë, avec douleurs et épanchement articulaire (Micheo et *al.*, 2010), qui seront à l'origine de la sidération musculaire du muscle quadriceps appelé également "*Arthrogenic Muscle Inhibition*" (AMI) (Rice and McNair, 2010). La perte du stabilisateur passif principal du genou par la rupture du LCA, va provoquer une instabilité du genou qui est majorée par la perturbation des moyens de stabilité active, induite par l'inhibition du quadriceps. De plus, il a été également rapporté une perturbation de la proprioception (statesthésie et kinesthésie) chez les patients présentant une rupture du LCA (Relph et *al.*, 2014; Roberts et *al.*, 2000). Ainsi, le sevrage de l'attelle et des béquilles se fera le plus vite possible afin de garder la musculature du membre inférieur et les afférences nociceptives induites par la marche (Logerstedt, 2010), mais sans prendre de risque de nouveaux accidents d'instabilité qui pourraient être délétères à l'avenir de l'articulation.

Puis, une fois la phase aigüe passée et que le genou a retrouvé une fonction correcte, une deuxième phase de rééducation est mise en place et aura pour objectif de guider le sportif vers la reprise de ses activités sportives. Pour cela, la rééducation proposera des exercices avec une progression dans les sollicitations du genou : travail en décharge, puis en charge partielle du

poids du corps (par exemple le vélo, le rameur...), puis en charge dans l'axe de la flexion/extension du genou (marche, course à pied, sauts...), et pour finir, des exercices avec des contraintes latérales et rotatoires (course avec changements de direction, pivots, sauts croisés...).

C'est à cette période qu'une décision importante dans la stratégie thérapeutique est prise afin que le patient puisse reprendre son sport, avec le moins de risques de nouvelle blessure.

1.4.2 LE CHOIX DU TRAITEMENT

Si le patient présente des lésions associées, et/ou qu'il pratique un sport de pivot/contact en compétition, un traitement chirurgical est recommandé.

La notion de "copers" ou "noncopers" intervient aussi dans la décision chirurgicale. En effet, les patients peuvent être classés parmi les deux sous-groupes suivant (Micheo et *al.*, 2010) :

- Les patients présentant une instabilité articulaire, qui ne peuvent reprendre un sport de pivots/contacts sans reconstruction du LCA et présentant des épisodes de "lâchage" du genou. Ils sont appelés les "noncopers".
- Les patients présentant une rupture du LCA, mais possédant une stabilité articulaire du genou leur permettant de reprendre une activité sportive soutenue, comme des sports de pivots/contacts, à la suite d'une rééducation bien menée et complète. Ils sont appelés les "copers".

Ainsi, si le patient est "noncopers", un traitement chirurgical est souhaitable.

Le traitement fonctionnel peut être proposé seulement au patient "copers", ne présentant pas d'instabilité articulaire, avec une lésion du LCA isolé (Kaplan, 2015). Pour pouvoir bénéficier d'un traitement fonctionnel, les patients ne doivent pas être à risque de nouvelle blessure, c'est-à-dire des sujets jeunes ayant une activité sportive et professionnelle très peu contraignante pour le genou, et ayant des capacités fonctionnelles des membres inférieurs suffisantes pour assumer la stabilité du genou (MacLeod et *al.*, 2014). La chirurgie pourra de toute façon se faire de façon éloignée du traumatisme primaire, sans être préjudiciable pour l'avenir du patient (Frobell et *al.*, 2010). Cependant, en cas de nouvelle blessure ou d'accident d'instabilité du genou, le traitement chirurgical sera proposé.

Pour mieux définir ces deux 2 sous-groupes (“copers”, “noncopers”), il est décrit l’utilisation de tests fonctionnels comme les Hop-Tests (ces tests sont décrits dans le paragraphe 1.6) (Button *et al.*, 2006; Fitzgerald *et al.*, 2000). Ils permettent d’objectiver les capacités de stabilisation dynamique du membre inférieur lors des activités supérieures de marche comme les sauts horizontaux, avec ou non des changements de direction, par une comparaison entre la distance réalisée en utilisant le membre lésé divisée par la distance réalisée en utilisant le membre sain. Un seuil de symétrie de 80-85% a été proposé comme normal (Barber *et al.*, 1990; Fitzgerald *et al.*, 2000). Ainsi, ces tests objectifs permettent de guider objectivement le clinicien et le patient dans leurs décisions pour l’avenir du genou.

1.4.3 LE TRAITEMENT FONCTIONNEL.

Comme vu précédemment, un traitement fonctionnel peut être proposé dans certaines conditions. Un certain nombre de patients dits “copers” peuvent se passer d’une chirurgie (Kaplan, 2015). Cela explique la découverte fortuite chez certains patients d’une rupture du LCA ancienne, n’ayant pas été diagnostiquée et n’ayant pas provoqué de gêne fonctionnelle (Bouchet, 2012).

Ce traitement fonctionnel est essentiellement constitué d’une rééducation divisée en 3 parties : 1) une phase post-traumatique, 2) une phase de récupération, 3) une phase de retour aux activités physiques supérieures (Micheo *et al.*, 2010).

La première phase comporte des soins de kinésithérapie permettant de diminuer la douleur et l’épanchement articulaire. L’objectif est de retrouver le plus vite possible des amplitudes articulaires normales, ainsi qu’une contraction volontaire du quadriceps permettant le verrouillage du genou.

La deuxième phase va permettre de retrouver des amplitudes de flexion et d’extension similaire au côté controlatéral. Des exercices principalement en chaîne cinétique fermée vont permettre de renforcer le quadriceps et d’améliorer son contrôle. Des exercices spécifiques permettront également un renforcement des muscles ischio-jambiers, et des muscles grand et moyen fessiers, sans oublier le triceps sural. Le but de cette phase est également de retrouver une proprioception et un équilibre permettant une reprise du sport. Les exercices intégreront des activités fonctionnelles dans les 3 plans de l’espace, en suivant une progression des contraintes : d’abord antéro-postérieures, puis médio-latérales, et enfin les pivots. Les activités

aérobies seront à commencer d'abord sur le vélo, puis progressivement sur un tapis de course, et enfin en extérieur, en s'assurant que cela soit effectué sans déclive afin de limiter les contraintes sur le LCA (Saxby et *al.*, 2016a).

Dans la **dernière phase**, le travail de la filière énergétique aérobie, débuté sur le vélo puis grâce à la course à pied, sera complété par un travail de la filière anaérobie, c'est-à-dire un peu plus intense. Ce type d'exercice sera l'occasion de mettre l'accent sur le travail d'appuis multiples et variés, ainsi que sur la pliométrie basse, moyenne puis haute. Les progressions se feront en fonction des réactions articulaires du genou (pas d'apparition de douleur ni d'épanchement articulaire).

Il est à noter que lors de lésions associées multiples, un traitement orthopédique approprié, s'inspirant des 2 premières phases rééducatives citées, sera proposé permettant une cicatrisation des éléments lésés. En effet, la cicatrisation des freins secondaires, comme le LCM, les ménisques ou les points d'angles, est un enjeu capital pour l'avenir fonctionnel du genou et une reconstruction pourra être envisagée alors par la suite.

La reprise du sport se fera progressivement et de façon individualisée, car c'est une phase délicate où la survenue de blessure est un risque important. Ainsi cette décision ne doit pas être trop précoce afin de respecter la physiologie de cicatrisation. Afin que la décision de reprise du sport soit la plus éclairée possible, elle devra se reposer sur des critères objectifs qui seront abordés dans la partie 1.5.

1.4.4 LE TRAITEMENT CHIRURGICAL : RECONSTRUCTION DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

Un traitement chirurgical est proposé si une des conditions ci-dessous est constatée (HAS, 2008b; Micheo et *al.*, 2010) :

- le patient présente une instabilité articulaire du genou,
- il est considéré comme à risque de nouvelle blessure de par son activité professionnelle ou sportive,
- il présente des lésions méniscales,
- si malgré un traitement conservateur bien mené un épisode d'instabilité est noté.

Le traitement chirurgical du LCA est une chirurgie orthopédique réalisée très fréquemment. En France, cela représentait 44 770 interventions en 2016 (ATIH, 2016). Aux Etats-Unis, cela représentait plus de 100 000 opérations par an, soit la 6^e chirurgie orthopédique (Hughes and Watkins, 2006; Kim et *al.*, 2011). Il est à noter que la chirurgie peut se faire à distance du traumatisme, sans être préjudiciable pour l'avenir du patient, tant qu'une prise en charge rééducative bien conduite est réalisée (Frobell et *al.*, 2010).

La reconstruction chirurgicale du LCA se fait par arthroscopie, à l'aide d'un greffon, fixé dans 2 tunnels : tibial et fémoral (Figure 1.4.4-1). Le greffon peut être de trois types : synthétique, issu de tissu cadavérique (allogreffe), ou issu de tissu du patient (autogreffe). Les plus utilisés et donnant les meilleurs résultats sont les reconstructions par autogreffe (Bottoni et *al.*, 2015), les deux autres possibilités étant réservées à des cas très particuliers (Ehkirch, 2012).

Une des techniques par autogreffe est celle utilisant une prise de greffe sur l'appareil extenseur, au niveau du tendon patellaire (type Kenneth Jones ou KJ (Jones, 1963)). Il permettait d'avoir aux extrémités de la greffe une partie osseuse permettant une meilleure intégration et fixation du greffon dans les tunnels osseux tibial et fémoral. D'autres techniques prélevant le tendon quadricipital sont de plus en plus utilisées (Slone et *al.*, 2015). Il existe d'autres techniques qui utilisent les muscles de la patte d'oie. Elles présentent l'avantage de diminuer les douleurs antérieures du genou et de posséder une morbidité moindre en n'affaiblissant pas l'appareil extenseur (Bottoni et *al.*, 2015). Les tendons des muscles gracile (ou muscle droit interne) et semi-tendineux (ou muscle demi-tendineux) ont donné leur nom à la technique opératoire les utilisant : le DIDT (Lipscomb et *al.*, 1982). De nos jours, certains chirurgiens utilisent seulement le tendon du semi-tendineux (DT4), permettant l'utilisation du tendon du gracile pour d'autres ligamentoplasties concomitantes (Ligament collatéral médial, latéral ou antéro-latéral).

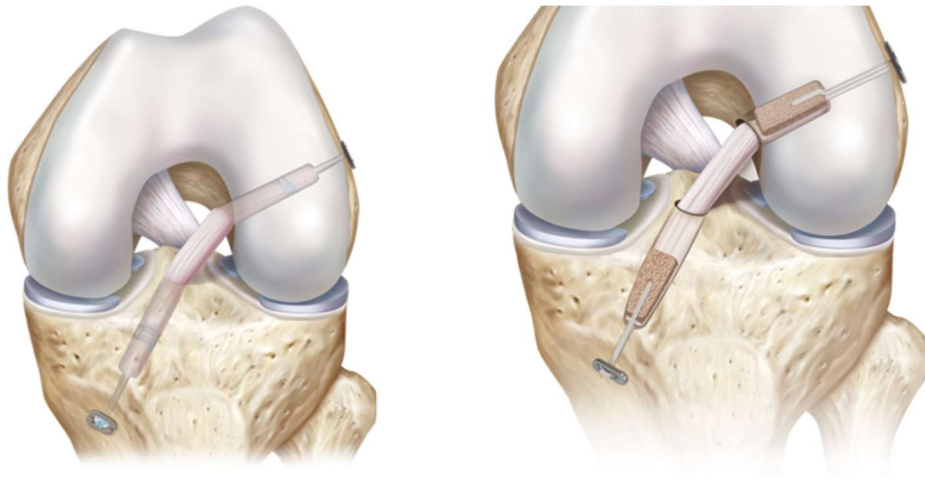


Figure 1.4.4-1. Reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur par allogreffe selon les deux techniques les plus utilisées: A: DIDT (Droit interne/ Demi Tendineux) avec prise de greffe sur les tendons de la patte d'oie ; B : KJ (Kenneth Jones) avec prise de greffe sur le tendon patellaire (source : Arthrex).

Malgré les améliorations faites dans la reconstruction chirurgicale du LCA grâce à l'apport de l'arthroscopie, la prise de greffe n'est pas sans conséquence :

- Pour la technique KJ, la prise de greffe se fait par prélèvement d'une baguette osseuse sur la patella et sur la tubérosité tibiale antérieure. Il a été dénombré dans de nombreux cas des douleurs antérieures du genou séquellaires chez les patients ayant bénéficié de ce type de chirurgie, ainsi qu'une fragilité accrue de la patella et du tendon patellaire (Biau et *al.*, 2006; Li et *al.*, 2011). Cependant, elle reste mentionnée comme une bonne technique chirurgicale, car il existe une bonne intégration de la greffe dans les tunnels.
- Pour la technique DIDT, la prise du greffe se fait sur deux des tendons de la patte d'oie, éléments contrôlant activement la stabilité rotatoire du genou. Lors de ce type de prise de greffe, il n'est pas rare d'observer en postopératoire un hématome situé au niveau de la face postérieure du genou et de la cuisse ainsi que des douleurs de type "lésion myo-aponévrotique" du semi-tendineux. Au long terme, plusieurs auteurs ont rapporté une faiblesse de la force des muscles ischio-jambiers, principaux éléments actifs de contrôle du tiroir antérieur du genou (Ardern et *al.*, 2010; Ko et *al.*, 2012; Moloney et *al.*, 2014). Cependant, les progrès des fixations de cette greffe permettent d'avoir une bonne fixation de la greffe, en plus de la préservation de l'appareil extenseur. Ceci peut expliquer le fait que cette technique soit la plus utilisée.

Cependant, il n'existe pas de supériorité d'une technique par rapport à l'autre sur la douleur postopératoire (Gupta et *al.*, 2016), la restauration fonctionnelle postopératoire (Li et *al.*, 2012), ni sur le long terme (Gifstad et *al.*, 2013), ni de différence du taux de re-rupture de la greffe ou du taux de retour au sport (Kaeding et *al.*, 2015; Laboute et *al.*, 2010).

Indépendamment du type de chirurgie, il est important de noter que l'arthroscopie et la réalisation de tunnel vont s'accompagner d'une inflammation de la synovie (Murray et *al.*, 2013). Cette inflammation permettra un processus de ligamentisation de la greffe. Cependant, cette articulation restera irritable et sensible aux contraintes, provoquant des épanchements réactionnels si une progression dans les activités et exercices n'est pas respectée (Dye, 1996).

La chirurgie est suivie d'une rééducation précoce, qui devra à la fois prendre en compte la greffe et sa ligamentisation, mais aussi des conséquences de la chirurgie comme les douleurs, l'épanchement articulaire et l'amyotrophie postopératoire du membre inférieur.

1.5 LA REEDUCATION APRES RECONSTRUCTION DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

1.5.1 LA REEDUCATION PREOPERATOIRE

Avant l'opération, il est proposé de plus en plus souvent une rééducation préopératoire permettant de préparer le membre inférieur lésé à la chirurgie comme indiqué dans la revue systématique et le consensus multidisciplinaire de van Melick et *al.* (van Melick et *al.*, 2016).

Elle doit alors comporter un travail visant une récupération des amplitudes articulaires, en particulier l'extension de genou, afin de préparer la chirurgie. En effet, s'il existe un déficit d'extension en préopératoire, il y a un risque majeur d'observer à nouveau ce déficit en postopératoire (van Melick et *al.*, 2016). Cette complication peut entraîner une boiterie et une impossibilité de renforcer le quadriceps dans toute l'amplitude articulaire du genou, notamment en extension et en verrouillage du genou (De Valk et *al.*, 2013; Quelard et *al.*, 2010). De plus, une perte de l'extension provoquera des désordres biomécaniques des articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibial, entraînant des pressions anormales sur le cartilage, et

s'accompagnant d'une inhibition du quadriceps (Cavanaugh and Powers, 2017; Kegerreis, 1983).

La rééducation préopératoire doit avoir également comme objectif la récupération de la force musculaire du muscle quadriceps : un déficit de force du quadriceps supérieur à 20% a été rapporté comme préjudiciable sur le score algofonctionnel (score d'un auto-questionnaire de satisfaction fonctionnelle) du patient à 2 ans de la chirurgie (De Valk et *al.*, 2013; Lopley and Palmieri-Smith, 2016).

Enfin, un travail sera réalisé sur les muscles ischio-jambiers, protecteur du LCA ou de sa greffe, ainsi qu'au niveau des muscles grand fessier, moyen fessier et triceps sural. Des exercices proprioceptifs et neuromusculaires accompagneront le renforcement musculaire (Harput G. et *al.*, 2015).

1.5.2 LA REEDUCATION POSTOPERATOIRE

Une fois la chirurgie réalisée, la rééducation postopératoire commence soit le jour même, soit le lendemain. L'objectif principal de la phase aiguë postopératoire est le management de la douleur, de l'épanchement articulaire et la gestion de l'hématome du site de prélèvement si DIDT. Tout cela doit permettre d'obtenir le plus rapidement une extension complète du genou et une contraction volontaire efficace du quadriceps permettant le verrouillage du genou.

Van Melick et *al.* en 2016 ont proposé, en s'appuyant sur une revue systématique de la littérature, un consensus multidisciplinaire sur les recommandations à suivre lors de la rééducation du LCA (van Melick et *al.*, 2016). Les grandes lignes qu'ils proposent sont :

- L'appui complet est autorisé et même souhaité tout de suite après l'intervention chirurgicale.
- L'application de froid permet de diminuer la douleur postopératoire lors de la première semaine.
- Le travail isométrique du quadriceps est à commencer le plus vite possible et l'électrostimulation neuromusculaire excitatrice est un bon moyen d'augmenter la récupération de la force.
- Le travail de renforcement musculaire est à commencer le plus tôt possible, à partir de la 2^{ème} semaine postopératoire environ, et ce en chaine cinétique fermée. La chaine cinétique ouverte peut être commencée seulement à partir de la 4^{ème} semaine entre 90° et 45° de flexion de genou

- Lorsque la sidération musculaire (AMI) du muscle quadriceps n'est plus observée, les exercices isométriques sont progressivement remplacés par des exercices concentriques puis excentriques, la progression se faisant en fonction de l'apparition de douleur et/ou d'un épanchement articulaire.
- Des exercices à visée neuromusculaire et proprioceptif doivent être combinés avec les exercices de renforcement musculaire, en s'assurant de la qualité et du contrôle du valgus dynamique des membres inférieurs lors de la réalisation de ces exercices.

Cependant, la CCO ne fait pas partie des protocoles de rééducation utilisés en France, car elle entraîne une translation tibiale importante en fin d'extension active, entraînant des tensions importantes sur le LCA ou sa greffe (Heijne *et al.*, 2004; Henning *et al.*, 1985). De plus, la CCF permet une variété d'exercices importants, dans un mode plus fonctionnel que les exercices en CCO, avec moins de contraintes fémoro-patellaires dans les 60 premiers degrés de flexion de genou (Steinkamp *et al.*, 1993). De ce fait, nous recommandons fortement la réalisation d'exercices en CCF et de prohiber ou limiter les exercices en CCO avant le 4 ou 6^{ème} mois postopératoire.

La Haute Autorité de Santé (HAS) a aussi émis des recommandations concernant la rééducation après chirurgie de reconstruction du LCA, dont les différentes phases sont détaillées ci-après (HAS, 2008a) :

La rééducation de la phase aiguë postopératoire

La rééducation vise principalement à diminuer les douleurs, prévenir les troubles trophiques et circulatoires, restaurer la mobilité d'extension et de flexion du genou (avoir une extension complète et une flexion d'environ 90° à J30), obtenir le verrouillage actif du genou en extension.

Pour cela, la rééducation aura également pour but de diminuer l'épanchement articulaire (mesuré par l'échelle de Stroke modifiée (Logerstedt, 2010) ou le périmètre patellaire), et d'éviter l'AMI en focalisant des exercices sur la contraction volontaire du quadriceps, permettant un verrouillage du genou en phase d'appui lors de la marche.

À partir de la 4^{ème} semaine postopératoire, le but est de retrouver une flexion permettant de faire du vélo stationnaire. Le renforcement en CCO des ischio-jambiers est seulement débuté si la greffe utilisée était le tendon du semi-tendineux. Si la technique chirurgicale était un KJ, le renforcement des ischio-jambiers sera débuté le plus tôt possible.

La rééducation de la phase secondaire :

Elle commence entre la 4^{ème} et la 6^{ème} semaine postopératoire, lorsque le genou a récupéré une amplitude articulaire de flexion supérieure à 120°. La rééducation secondaire suit principalement 5 objectifs : 1) restaurer les amplitudes articulaires par rapport au côté controlatéral ; 2) rester vigilant sur les troubles circulatoires ; 3) obtenir un contrôle actif du genou afin d'avoir une bonne stabilité ; 4) renforcer le membre inférieur controlatéral ; et 5) obtenir une parfaite stabilité fonctionnelle.

C'est donc la phase du renforcement musculaire, avec des exercices proposés plus fonctionnels. L'objectif est de préparer le patient à des exercices de plus en plus contraignants pour l'articulation du genou, afin de préparer le retour au sport. Des exercices neuromusculaires variés doivent permettre un bon contrôle du valgus dynamique du genou lors des exercices bipodaux et unipodaux. Le travail de pliométrie est réalisé progressivement, et de façon quantifiée pour éviter toute réaction articulaire ou douleurs (Chmielewski et *al.*, 2016). Il permettra également de préparer le retour à la course à pied.

La reprise des activités sportives

La reprise des activités sportives et leur description seront abordées dans la partie 1.6. Cette phase délicate doit s'adapter aux consignes chirurgicales postopératoires et aux objectifs et caractéristiques du patient (HAS, 2008a).

1.5.3 LA COURSE A PIED COMME MOYEN DE REEDUCATION

Définition de la course à pied

En fonction de la vitesse de déplacement de l'individu, des stratégies de locomotion sont utilisées allant de la marche pour des vitesses de déplacement faibles, à la course à pied pour se déplacer avec une vitesse supérieure, jusqu'au sprint, activité de locomotion permettant d'atteindre la vitesse maximum de l'individu.

La course à pied est une succession de mouvements de bondissement unipodaux vers l'avant, ce qui implique des ajustements très complexes de l'équilibre, de l'activité musculaire et de la coordination des membres inférieurs (Lacouture et *al.*, 2013). La flexion et l'extension

de ses trois principales articulations (hanche, genou, cheville) dans le plan sagittal se font de façon coordonnée grâce à la force produite par les muscles et transmise au squelette par les tendons. Contrairement à la marche, il n'existe pas de phase durant laquelle les deux membres inférieurs sont simultanément en appuis (Lacouture et *al.*, 2013).

Les contraintes biomécaniques sur le LCA et le genou liées à la course à pied

In vivo, des études ont rapporté les contraintes pour le LCA lors de la course à pied, mais aussi lors de la marche et du vélo stationnaire (Heijne et *al.*, 2004; Henning et *al.*, 1985). Chez deux patients, Henning et *al.* les ont comparées à celle induite par le test de Lachman, couramment utilisé pour diagnostiquer la rupture du LCA (Henning et *al.*, 1985). Les résultats étaient pour le vélo de 7%, la marche de 36% et la course à pied entre 61 et 89% (en fonction du type de course) des contraintes induites lors d'un test de Lachman (Henning et *al.*, 1985). Tous ces résultats nous indiquent que ces activités induisent des contraintes modérées sur le LCA ou sa plastie. In vivo, grâce des modélisations, il a été également mesuré des contraintes sur le LCA d'environ 0,62 BW pour la course à pied et de 0,7 BW pour la marche (Roldán et *al.*, 2017), valeurs très proches l'une de l'autre, montrant le faible impact mécanique de la course à pied sur le LCA. Cependant, lors de la course à pied en descente, les contraintes qui lui sont exercées étaient très importantes, 25% de plus qu'un test de Lachman à 355 N (Henning et *al.*, 1985). La course à pied semble donc être une activité de locomotion non contraignante pour le LCA lorsqu'elle est réalisée sur terrain plat, mais il est important de définir les modalités de la course à pied pendant la rééducation postopératoire afin de ne pas mettre en danger la reconstruction chirurgicale du LCA.

La course à pied induit cependant de fortes contraintes mécaniques pour l'articulation fémoro-tibiale comparées aux activités de marche ou de vélo (7,83 BW à la course contre 2,83 BW à la marche (Tableau 1.5.3-1) (Saxby et *al.*, 2016b) et de 0,6 à 1,7 BW pour le vélo (Kutzner et *al.*, 2012). Pour l'articulation fémoro-patellaire, il a été rapporté également des contraintes entre 7 et 11 BW lors de la course à pied (Novacheck, 1998), nous indiquant des forces importantes induites à l'appareil extenseur. Il en est de même pour le tendon d'Achille (de 6 à 8 BW) (Novacheck, 1998), autre structure tendineuse très importante pour la locomotion.

Tableau 1.5.3-1. Contraintes moyennes calculées exercées sur le plateau tibial lors de différentes tâches de locomotion (Saxby et *al.*, 2016a, 2016b).

	Sujets sains	Patients opérés du LCA	p-value
Marche à pied à 5,2 km/h	2,83 ± 0,64 BW	2,38 ± 0,52 BW	0,001
Course à pied à 15,6 km/h	7,83 ± 1,48 BW	6,98 ± 1,08 BW	0,001
Course en diagonale 12,9 km/h	8,47 ± 1,57 BW	7,22 ± 1,35 BW	0,001

Enfin, après une rupture du LCA, il existe une inflammation de la synovie, retrouvée jusqu'à 3 ans après la reconstruction (Amano et *al.*, 2018). Les synoviocytes sont des cellules très actives qui peuvent réagir aux différents stress induits à l'articulation, comme par exemple la course à pied, par une augmentation du volume articulaire (Manunta et *al.*, 2014). Il a été rapporté également qu'il existait une modification des propriétés du cartilage après la course à pied, mis en évidence par IRM (Imagerie par résonance magnétique), et retrouvée au niveau de l'articulation fémoro-tibiale (principalement au niveau du compartiment médial) et fémoro-patellaire (Subburaj et *al.*, 2012). Ainsi, même si la course à pied induit de faibles contraintes pour le LCA ou sa greffe, les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale doivent s'adapter à un stress mécanique allant jusqu'à 11 fois le poids du corps. Il est donc primordial de faire une gestion de la reprise de la course à pied lors de la rééducation.

La course à pied en rééducation

La rééducation doit à la fois préparer le patient à cette activité, demandant force et coordination, mais aussi l'accompagner dans sa reprise par un programme individualisé et progressif.

Lors de la phase secondaire de la rééducation, lorsque le patient possède un genou sec, indolore, une extension complète et une récupération de la flexion supérieure à 120°, il est proposé des exercices neuromusculaires avec des progressions en amplitudes, mais aussi en contraintes articulaires. Les exercices de pliométrie, utilisant des sauts, permettent de moduler le stress mécanique induit au membre inférieur (Chmielewski et *al.*, 2006, 2016). Une progression de ce type d'exercices permet ainsi de préparer le genou opéré à ces nouvelles contraintes, en vue de la reprise de la course à pied. Ils sont généralement inclus avec les autres exercices de renforcement musculaire et de proprioception. Même si les exercices pliométriques sont couramment utilisés dans la rééducation de la reconstruction chirurgicale du

LCA, aucun consensus n'a été proposé dans les exercices à proposer au patient afin d'optimiser la reprise de la course à pied.

Le programme de reprise de la course à pied doit tenir compte des paramètres de temps de course, de temps de repos (relatif comme par exemple la marche, ou complet), et des paramètres de locomotion comme la vitesse, la cadence de la foulée, la distance, la surface du terrain et le dénivelé. Adams et *al.* ont proposé un exemple de progression de reprise de la course à pied, modulé en fonction des douleurs/gènes qui pourraient se manifester et de l'apparition d'un épanchement articulaire (Adams et *al.*, 2012). Les premiers niveaux associent des temps de marche et de course à pied alternés. Pour passer d'un niveau à l'autre, le patient doit réaliser 2 entraînements sans douleur ni épanchement articulaire réactionnel (voir partie 1.6.2).

Des indications de cadence et de longueur de foulée pourraient être associées à ce type de protocole afin de prendre en compte la particularité de la rupture du LCA et de sa reconstruction chirurgicale. En effet, la réduction de la longueur de foulée permet de réduire les contraintes articulaires au niveau du genou, permettant une protection cartilagineuse : une diminution de 7,5% à 10% de la longueur du pas entraînait une diminution de 12% du pic de force au niveau des articulations fémoro-patellaire et tibio-fémorale, de 13 à 14% de la force d'impulsion au sol, et de 13 à 20 % du loading rate (coefficient d'application de la contrainte du sol au squelette) (Bowersock et *al.*, 2017).

1.6 LE RETOUR AU SPORT

1.6.1 LA DEFINITION DU RETOUR AU SPORT : “RETURN TO SPORT CONTINUUM”

Après une blessure liée au sport, la première question le plus souvent demandée par le sportif est : « Quand est-ce que je pourrais revenir sur les terrains de compétition ? » (Ardern et *al.*, 2016). La réponse à cette question est rarement claire et précise, car elle dépend de nombreux paramètres (type de blessure, lésions associées, type de sport et type de poste ...). De nombreuses publications se sont intéressées au retour au sport ces dernières années, en

mettant le sportif au cœur de cette décision (Gokeler et al., 2017; Kyritsis et al., 2016; Morris et al., 2016; Nyland J. et al., 2016). Cependant, différentes terminologies étaient utilisées (par exemple “return to play” ou “return to sport”), et de nombreux auteurs proposaient chacun leurs étapes à mettre en place pour le retour au sport, sans réelle uniformité. Ainsi, lors du 1^{er} congrès international de la kinésithérapie du sport à Berne (www.sportfisio.ch/fr/rtp-2015/), organisé par l’International Federation of Sports Physical Therapy (IFSPT, http://ifspt.org/), des experts se sont regroupés afin d’établir un consensus sur les étapes du retour au sport, pendant et après la rééducation (Arderm et al., 2016).

Ils ont défini un continuum de retour au sport en 3 étapes (Figure 1.6.1-1) :

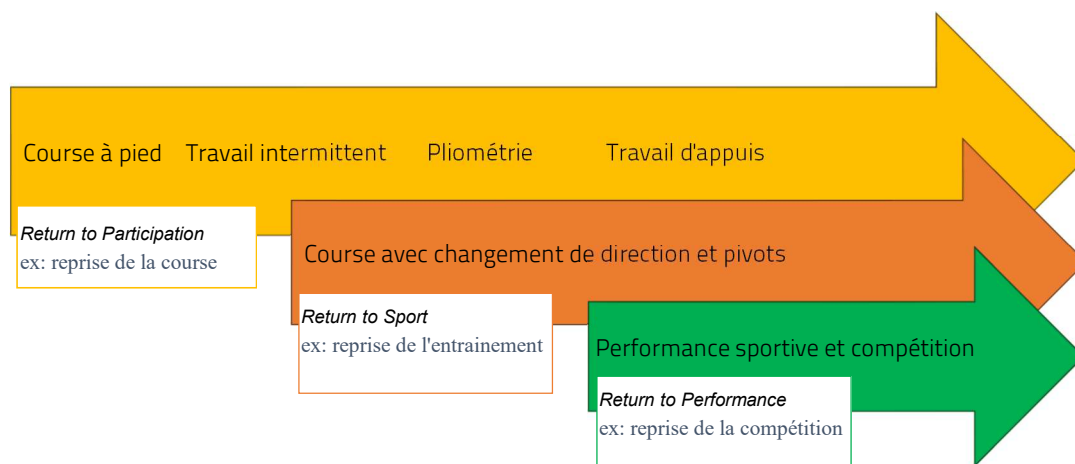


Figure 1.6.1-1. Return to Sport continuum d’après Arderm et al. (2016). Etape 1 : Return to participation : retour à l’activité sportive, mais avec certaines restrictions ; Etape 2 : Return to Sport : Retour aux activités sportives sans restriction, mais sans compétition ; Etape 3 : Return to performance : Retour aux activités sportives sans restriction : c’est le retour à la compétition et à la performance sportive.

1) “**Return to Participation**” : le retour à l’activité physique et sportive, mais avec certaines restrictions. C’est dans cette phase-là que s’effectue la reprise de la course à pied, par exemple, le travail athlétique, la natation, mais toujours avec des restrictions qui sont de plusieurs types :

- Intensité et fréquence de travail : La reprise des activités sportives doit suivre une progression, afin que les membres inférieurs opérés, et sains, puissent s’adapter aux nouvelles contraintes, afin de rester dans la zone d’homéostasie des capacités de l’articulation et de respecter son enveloppe de fonction (Dye, 1996) (Figure 1.6.1-2). L’enveloppe de fonction décrite par Dye, est une représentation graphique simple des capacités fonctionnelles du genou et des autres articulations à accepter,

transférer et dissiper les contraintes induites par le sol au squelette. Ce graphique se construit avec en ordonnée les charges croissantes appliquées, et en abscisse la fréquence de ces contraintes.

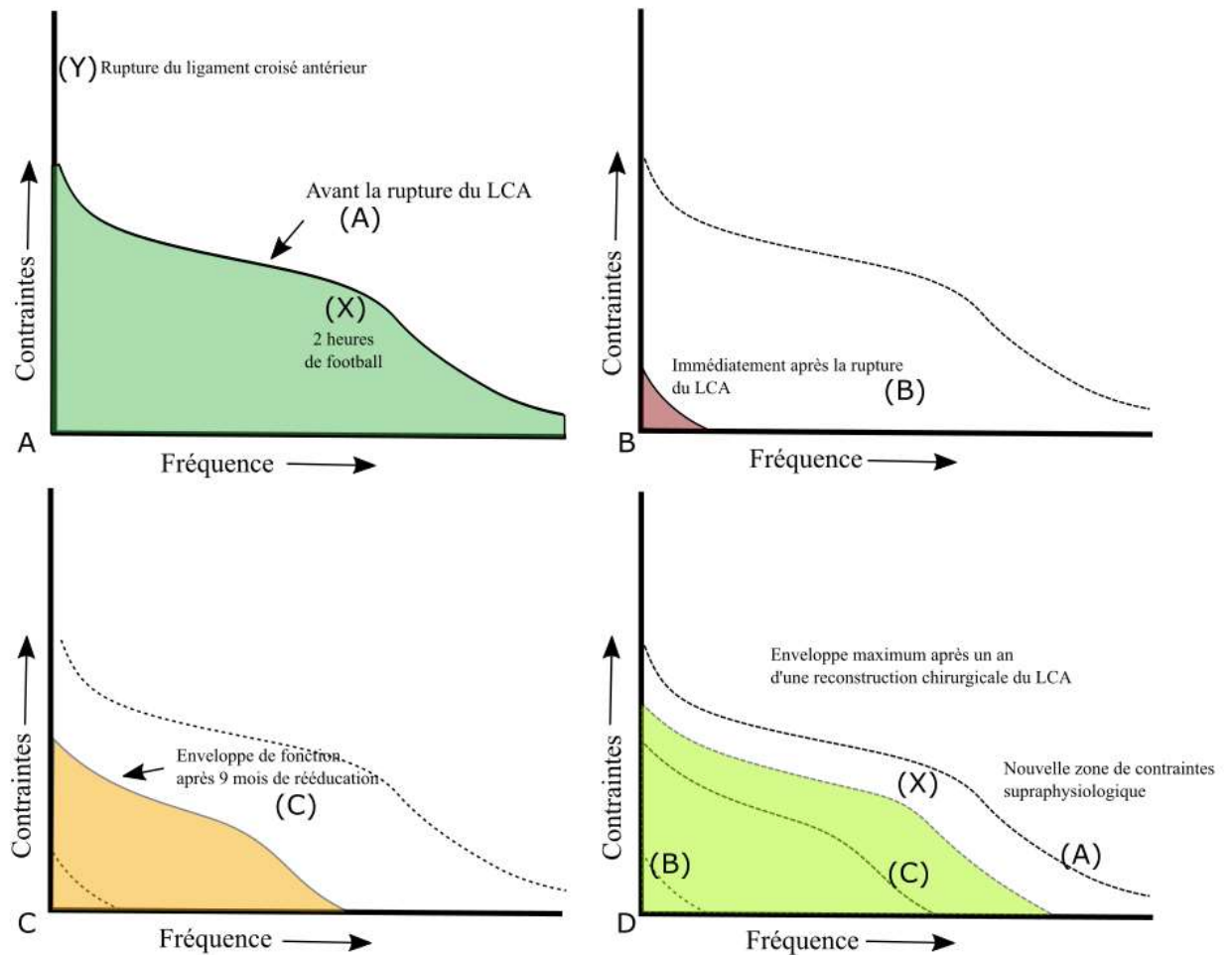


Figure 1.6.1-2. L'évolution dans le temps de l'enveloppe de fonction du genou après une rupture du ligament croisé antérieur (LCA) (A). L'enveloppe de fonction pré-blessure (X) d'un sportif pratiquant 2 heures de football. (Y) représente la contrainte responsable de la rupture du LCA. En (B), l'enveloppe de fonction tout de suite après la blessure. En (C) l'enveloppe de fonction après 9 mois de rééducation. En (D), l'enveloppe de fonction après un an d'une reconstruction chirurgicale du LCA. D'après Dye SF (1996).

- Modalités et contraintes mécaniques : les pivots et changements de direction soudains sont à proscrire durant cette phase, afin d'éviter tout accident d'instabilité. Il sera également exclu les activités d'oppositions et de contacts avec un adversaire.

Cette phase est encore protectrice pour la reconstruction du LCA. Elle fait le lien entre la rééducation avec le kinésithérapeute et le terrain de sport avec l'entraîneur ou le préparateur physique.

- 2) “**Return to Sport**” : le retour au sport sans restriction d'activité, mais sans compétition : c'est le retour à l'entraînement complet. Le sportif reprend progressivement les activités de pivots et de changements de direction. Puis rapidement, il sera autorisé à reprendre les entraînements avec oppositions et contacts. Cependant, l'entraînement pourra être adapté afin d'être progressif, par modification soit de la qualité du contenu, soit de sa quantité (ex : faire seulement la première partie de l'entraînement). Cette étape prépare le patient sportif à la compétition. En fonction de la planification des entraînements, de la période de compétition, le sportif pourra participer à tout l'entraînement ou en partie, avec parfois un travail individualisé qui lui permettra de s'adapter à ses capacités. La communication entre le staff technique et médical est alors un élément déterminant dans la réussite de cette phase.

Cette phase est également importante pour rassurer le patient sur la récupération fonctionnelle de son genou. Cet aspect psychologique est à prendre en compte, car le traumatisme de la blessure est en mémoire, et le patient est de nouveau confronté à ce risque. Le patient sportif doit également s'accommoder d'une perte de performance, liée à sa convalescence et aux conséquences de la chirurgie.

- 3) “**Return to Performance**” : c'est le retour à la compétition, avec un objectif de performance sportive pour le patient. Lors de cette phase-là, il doit viser à retrouver son niveau d'avant la blessure, en termes de niveau de performance et de volume de sport (ex. : division dans laquelle le patient jouait, et même temps de jeu). “ Le Patient ” devient “ le Sportif ”.

Pour passer d'une étape à l'autre, Ardern et *al.* (Ardern et *al.*, 2016) ont proposé dans leur consensus d'utiliser le modèle de Shrier (Shrier, 2015) prenant en compte en globalité le patient et sa blessure : la lésion et son processus de guérison (aspect organique de la blessure), les contraintes qui lui seront induites lors de la prochaine étape de retour au sport (aspect fonctionnel de l'activité), et les modificateurs de tolérance aux risques de l'individu et de son entourage (figure 1.6.1-3).

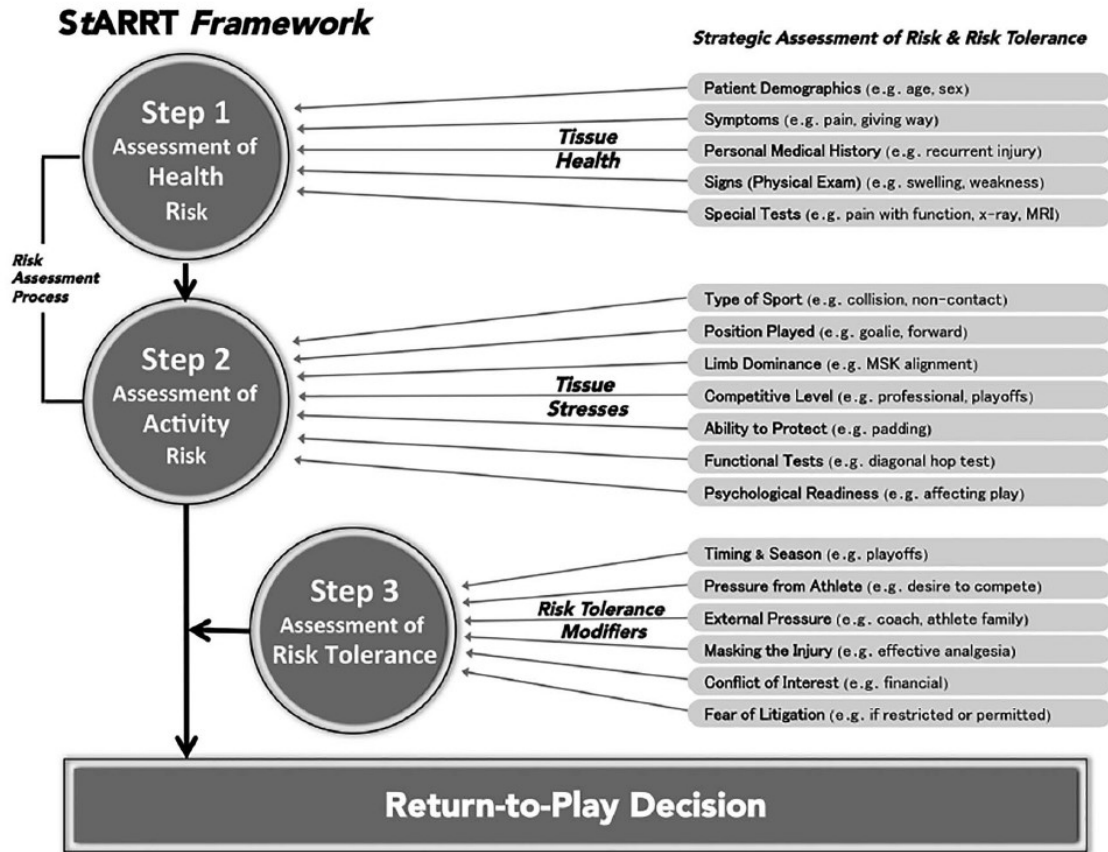


Figure 1.6.1-3. Le cadre décisionnel “Strategic Assessment of Risk and Risk Tolerance (StARRT)” pour la décision du retour à l’activité sportive. Le sportif doit d’abord passer l’étape 1 puis l’étape 2 afin que la reprise de l’activité se fasse avec le moins de risque possible de blessure. Cette décision est modulée par l’étape 3 du cadre décisionnel StARRT, permettant de prendre en compte les modificateurs de tolérance aux risques de blessures. Figure tirée de Shrier et al. (2015)

Ce consensus indique également qu’il doit y avoir une progression dans les charges de travail, s’inspirant de “the Goldilocks approach” ou l’approche “ni trop peu ni pas assez”. En effet, Blanch et Gabbett (Blanch and Gabbett, 2016) ont démontré que pour prévenir les blessures, un volume de travail minimum est nécessaire, ainsi qu’une progression. Ils ont donc proposé un ratio (“acute:chronic workload”) pour effectuer le monitoring d’entraînement : le volume de travail de la semaine (“acute”), divisé par la moyenne de volume des 4 dernières semaines de travail (“chronic”). Le ratio permettant d’avoir le moins de risque de blessure était compris entre 0,8 et 1,3 (Gabbett, 2016).

Ces recommandations s’appliquent au retour au sport de manière générale, et nous allons maintenant décrire ce continuum pour le retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA.

1.6.2 LA REPRISE DE LA COURSE A PIED

Après reconstruction chirurgicale du LCA, des activités peu traumatisantes pour l'articulation du genou ont généralement été débutées entre le 1^{er} et le 2^{ème} mois postopératoire, comme le vélo d'appartement ou la natation (sauf la brasse) (HAS, 2008a). Le rameur peut également être proposé si le patient possède la bonne technique (afin de protéger son rachis, par exemple). Ces activités permettent de préparer l'étape suivante de la reprise d'activité sportive : la course à pied.

Vraie première étape du retour aux activités sportives, le retour à la course à pied fait partie du « **Return to Participation** » (Adams et *al.*, 2012; Myer et *al.*, 2006). Elle se déroule habituellement pendant la phase de rééducation et pose les bases de la future reprise d'activités de pivots/contacts (deuxième partie du continuum de retour au sport). Les délais pour reprendre la course à pied sont usuellement décrits entre le 2^{ème} et le 4^{ème} mois postopératoires (Adams et *al.*, 2012; HAS, 2008a).

Adams et *al.* ont proposé un programme de reprise de la course à pied qui est modulé par des règles prenant en compte les douleurs ressenties (Tableau 1.6.2-1), et qui, dans les premiers niveaux, alterne la marche et la course à pied (Adams et *al.*, 2012). Ainsi, les principes de progression des contraintes lors de la reprise du sport sont respectés.

Cependant, aucun critère objectif n'est proposé pour autoriser cette reprise de la course à pied, et aucun consensus n'est retrouvé dans la littérature scientifique (Logerstedt, 2010; van Melick et *al.*, 2016), alors que cette activité est une des premières étapes du continuum de retour aux sports et semble être le socle biomécanique et technique indispensable à une très grande partie des activités sportives.

Tableau 1.6.2-1. Règles de progression du programme de course à pied en fonction de la douleur et proposition de programme de retour à la courwe à pied. (Adams et al., 2012).

Règles de progression en fonction de la douleur		Niveau d'exercices de course à pied (sur une piste d'athlétisme 400m)	
Critère	Action		
		1	Course en ligne droite, marche dans les courbes (8 tours).
Douleurs pendant l'échauffement et continuant pendant l'effort.	2 jours d'arrêt et retour au palier précédent.	2	Course en ligne droite, course dans une des courbes tous les 2 tours (8 tours).
Douleurs pendant l'échauffement et disparaissant.	Rester au même palier tant que la douleur est présente.	3	Course en ligne droite, marche dans une des courbes à chaque tour (8 tours).
Douleurs pendant l'échauffement et disparaissant, mais réapparaissant pendant la session.	2 jours d'arrêt et retour au palier précédent.	4	Course 1 tour 3/4, marche dans la dernière partie (8 tours).
Douleur le jour après la séance (Hors courbature).	1 jour de repos et rester au même palier.	5	Course pendant les 8 tours.
Pas de douleur.	Augmenter d'un palier par semaine.	6	Course pendant les 10 tours.
		7	Course pendant les 12 tours.
		8	Course pendant les 12 tours, en augmentant la vitesse en ligne droite puis course en récupération dans les courbes.

1.6.3 LA REPRISE DU SPORT PIVOT-CONTACT

La reprise des pivots et changements de direction se fait pendant la phase "**Return to Sport**", deuxième étape du continuum de retour au sport. Généralement, elle va débuter à partir du 6^{ème} mois postopératoire (HAS, 2008a). Une évaluation médicale est suggérée dans le cadre du suivi postopératoire pour prendre cette décision (HAS, 2008a). Cette décision est importante, car il y a malheureusement de nombreuses blessures après reconstruction chirurgicale du LCA : 3 à 19% de récurrences de rupture du LCA, 5 à 24% d'atteintes controlatérales, pour un suivi minimal de cinq ans (Barber-Westin and Noyes, 2011b; Thomeé et al., 2011).

Pour aider à la décision de retour au sport avec pivots et contacts, une batterie de tests est recommandée afin de savoir si le sportif est prêt pour le retour sur le terrain sans restriction (van Melick et *al.*, 2016). Elle va permettre de s'assurer de la récupération fonctionnelle du patient, en comparant par exemple les capacités du membre opéré à celle du membre controlatéral sain. Cela permet l'établissement d'indices de symétrie. L'indice le plus souvent utilisé est le "*Limb symmetry Index*" (LSI), c'est un ratio entre le score du membre opéré divisé par le score du membre sain.

La batterie de tests peut comprendre de façon générale :

- Des questionnaires algofonctionnels : par exemple l' International Knee Documentation Committee (IKDC) (Ebrahimzadeh et *al.*, 2015) ;
- Des questionnaires d'évaluation de la peur de la blessure : par exemple le Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) (Bohu et *al.*, 2014) ;
- Une évaluation musculaire isocinétique des fléchisseurs et extenseurs du genou ;
- Une évaluation fonctionnelle par les Hop Tests (Noyes et *al.*, 1991) (figure 1.6.3-1).

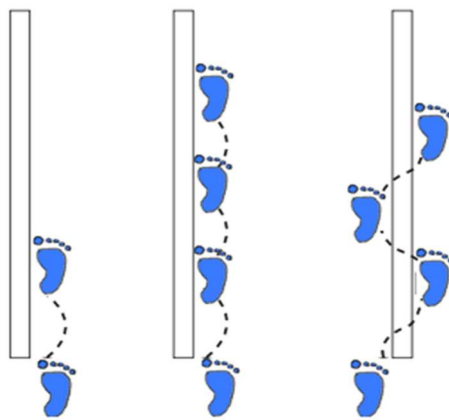


Figure 1.6.3-1. Simple saut (*Single Hop Test for Distance* ou SHT), le Triple saut (*Triple Hop Test for Distance* ou THT) et le Triple saut croisé stabilisé (*Crossover Hop Test for Distance* ou COHD) d'après Noyes et *al.* (1991).

- Une évaluation de l'équilibre et de la proprioception : le SEBT (Star Excursion Balance Test), et sa version simplifiée comme décrit par Gribble et *al.* (Gribble et *al.*, 2012) (Figure 1.6.3-2.).

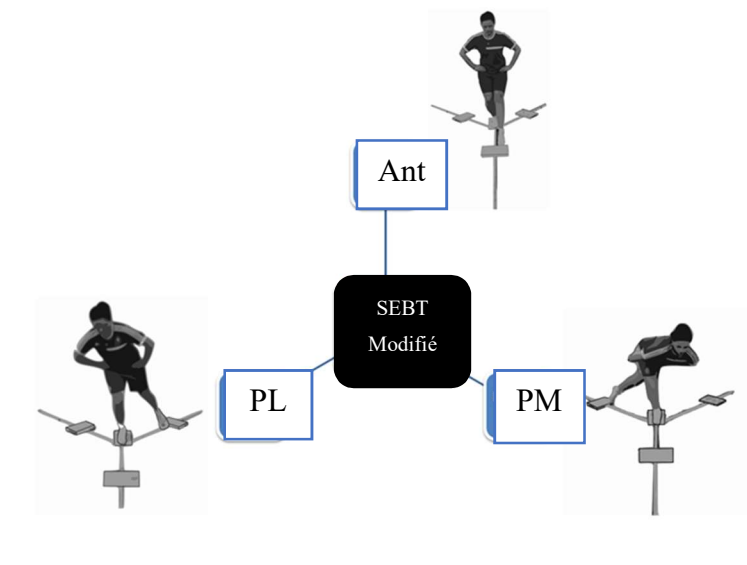


Figure 1.6.3-2. Star Excursion Balance Test modifié: En appui sur le genou droit, et amenant son pied gauche dans la position antérieure (Ant), puis postéro-latérale (PL) et enfin en position postéro-médiale (PM). Gribble et *al.* (2012).

- La laximétrie du tiroir antérieur du genou mesurée objectivement, par exemple avec le GNRB® ;
- Des questionnaires de kinésophobie : Tampa Scale for Kinesophobia (TSK-11) (Woby et *al.*, 2005)).

Cependant, aucun test ou batterie de tests ne fait consensus. Barber et Noyes (Barber-Westin and Noyes, 2011b), dans une revue systématique de la littérature, rapportaient l'utilisation de critères objectifs pour la reprise du sport dans seulement 19% des études. Van Melick et *al.*, dans leur consensus multidisciplinaire ont donc proposé une recommandation du contenu des batteries de tests à utiliser. Elle doit inclure un examen clinique permettant de s'assurer de l'absence de douleur et d'épanchement articulaire, des amplitudes articulaires de genoux comparables, une évaluation de la force musculaire, des Hop Tests, et une évaluation de la qualité du mouvement lors de la réception (van Melick et *al.*, 2016). De plus en plus d'équipes proposent également un test de performance de terrain, comme par exemple le T-Agility Test, tests de changement de direction où le patient doit courir le plus vite possible sur un parcours en forme de "T" obligeant des déplacements variés (course en avant, en arrière et latérale) (Kyritsis et *al.*, 2016). Ce test permet une évaluation de la course à pied dans tous ces

modes (course avant, arrière et latérale) et permet d'objectiver la performance (temps réalisé par le test), mais également permet d'observer la présence ou non d'une asymétrie lors de la course dans les 4 directions. Cependant, ce test ne permet pas d'objectiver l'asymétrie et ce test ne peut être réalisé qu'à partir du 6^{ème} mois postopératoire.

Le retour au sport n'est pas une chose facile. A 12 mois de la chirurgie, l'étude prospective multicentrique du groupe MOON (Multicenter Orthopaedic Outcomes Network) (Brophy *et al.*, 2012) rapportait que seuls 61% des joueurs de football avaient retrouvé leur niveau de compétition antérieur à la rupture du LCA. Tous sports confondus, le taux de patients capables de retrouver un niveau préopératoire était estimé à 65% à deux ans (Gobbi and Francisco, 2006), et 63% à trois ans (Arderm *et al.*, 2011).

Le taux de retour au sport dépend également du niveau de pratique pré-blessure et le statut du sportif. Seulement 65% des sportifs professionnels jouaient au même niveau qu'avant la rupture du LCA à 3 ans de la reconstruction chirurgicale du LCA (Walden *et al.*, 2016). Alors que pour les compétiteurs amateurs, 40% jouaient au même niveau, 25-28% reprenaient le sport à un niveau de compétition inférieur, et environ 30% ne reprenaient pas leur sport à deux ans de la chirurgie (Arderm *et al.*, 2014, 2015). Chez le sportif amateur, cela peut être expliqué par les contraintes familiales, professionnelles ou de nouveaux modes de vie qui n'encouragent pas la reprise du sport en compétition. Ainsi, reprendre tardivement le sport en compétition, entre 9 et 12 mois selon les dernières recommandations de Grindem *et al.* (Grindem *et al.*, 2016), pourrait favoriser ce changement de mode de vie et donc expliquer la non-reprise du sport. Enfin, une des principales raisons du non-retour au sport serait la peur de se blesser à nouveau (Arderm *et al.*, 2011; Flanigan *et al.*, 2013). Ainsi, les aspects psychologiques et la kinesophobia sont à prendre en compte à la fois dans la décision de reprise du sport, mais aussi tout au long de cette phase.

Nous sommes donc face à un dilemme : une reprise trop tardive entraîne un risque de ne pas reprendre son activité sportive (même si la compétition est la raison principale pour le patient de se faire opérer), et reprendre trop tôt expose le patient à un risque de nouvelle rupture du LCA, compromettant son avenir sportif et l'intégrité future de ses genoux. **Il est donc important de bien définir les modalités de la reprise du sport, afin d'obtenir une balance bénéfice / risque largement en faveur du patient. De même, il est primordial de mieux définir les moyens et les critères d'évaluations aidant à cette décision de reprise du sport.**

Problématique

À la suite de la rupture du LCA, le risque d'arthrose précoce augmente (Andriacchi et *al.*, 2004). La reconstruction chirurgicale du LCA permet une très bonne stabilisation de l'articulation du genou. Cependant, la chirurgie ne permet pas, à elle seule, de diminuer le risque dégénératif de l'articulation (Brophy et *al.*, 2012). Une récupération analytique et fonctionnelle incomplète serait un élément favorisant l'apparition d'arthrose précoce provoquée par une altération de la biomécanique de l'appareil locomoteur (Paterno et *al.*, 2010). Une rééducation incomplète conduit malheureusement à ces désadaptations (Culvenor and Barton, 2017). Ainsi, une prise en charge rééducative bien conduite semble être un élément clé car protecteur de l'avenir du genou. Elle doit se focaliser sur la récupération analytique puis fonctionnelle du genou opéré, mais également des deux membres inférieurs dans leur globalité (van Melick et *al.*, 2016). Pour cela, la rééducation doit comporter des évaluations régulières, pour permettre un accompagnement du patient vers la reprise du sport au niveau antérieur, tout en minimisant les séquelles futures du genou (van Melick et *al.*, 2016).

La rééducation a également pour but d'éviter la récurrence de rupture du LCA ou l'apparition de nouvelles blessures. En effet, la récurrence entraînerait des préjudices importants pour l'articulation fémoro-tibiale (lésions méniscales, cartilagineuses, ligamentaires et capsulaires), et doit être à tout prix évitée. Un taux élevé de récurrence de rupture du LCA est rapporté dans la population souhaitant reprendre la compétition des sports pivot/contact (Paterno et *al.*, 2012), et de façon similaire il est observé de fréquentes ruptures du LCA controlatéral (Webster et *al.*, 2014a). Ainsi, le risque de nouvelle blessure du LCA (opéré ou controlatéral) doit guider le processus d'autorisation de la reprise du sport.

Il est noté également que malgré les progrès chirurgicaux et de nombreuses recommandations concernant le retour au sport, de nombreux sportifs ne reprennent pas leur activité sportive au même niveau de pratique et/ou de compétition dans les suites d'une chirurgie du LCA (Arden et *al.*, 2011). Cela pourrait s'expliquer par une reprise trop précoce, par un manque de récupération fonctionnelle ou par une appréhension de la récurrence, entraînant une nouvelle blessure du LCA opéré ou controlatéral ; parfois la reprise du sport s'accompagne d'une diminution de la performance, ne permettant pas un retour à la compétition au niveau antérieur à la rupture du LCA. Ainsi, la décision de la reprise sportive a une place primordiale dans la réussite du retour au sport, et représente également un enjeu important pour le succès de la prise en charge chirurgicale d'une rupture du LCA.

Pour le patient ayant bénéficié d'une reconstruction du LCA, son principal objectif est le retour au sport, au niveau antérieur à la rupture du LCA. L'objectif de la prise en charge est

d'accompagner le patient à reprendre son activité sportive en minimisant le risque lésionnel, et en limitant le risque de séquelles à long terme. Il est suggéré de le réaliser en plusieurs étapes : 1) retour aux activités sollicitant peu le LCA, 2) retour aux activités pivot/contact sans compétition, et 3) retour à la compétition (Arden et *al.*, 2016). La course à pied fait partie des activités sollicitant faiblement le LCA (Roldán et *al.*, 2017), et elle représente un élément de base pour la plupart des activités sportives, et probablement aussi un moyen de rééducation pertinent (Adams et *al.*, 2012). Cependant, un délai postopératoire minimum est nécessaire pour que l'articulation du genou puisse subir les contraintes articulaires de la course à pied. Ainsi, la reprise de la course à pied et sa décision représentent un élément important dans le continuum de reprise du sport. **Cependant, quel est le temps postopératoire nécessaire pour pouvoir reprendre la course à pied ? Existe-t-il des critères objectifs aidant à la décision de cette reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA ?**

À 6 mois postopératoires, les patients sont généralement autorisés à reprendre le sport pivot/contact sans compétition. Pourtant les patients n'ont pas repris la course à pied au même délai postopératoire et donc n'ont pas eu le même volume d'entraînement à la course à pied avant cette reprise du sport pivot/contact. Certains pourraient avoir repris la course à pied à 3 mois postopératoires, et bénéficieraient d'environ 3 mois de travail de réathlétisation (à base de course à pied et de travail d'appuis), alors que d'autres ayant repris la course à 4,5 mois par exemple, auraient seulement 1,5 mois de réathlétisation lors du passage à la deuxième étape du continuum de retour au sport. **Est-ce que tous les patients ont un pattern de course à pied « normalisé » lors de la reprise des sports de pivot/contact ? Est-ce que le temps de réentraînement à la course à pied a une influence sur le pattern de course à pied ?**

De plus, à 6 mois, il est maintenant proposé une batterie de tests pour autoriser la reprise du sport pivot/contact. Cependant, malgré cette amélioration dans la décision du retour au sport, il est observé de nombreuses blessures du LCA (du genou opéré ou non) principalement lors de la première année postopératoire. Ce constat d'échec nous fait réfléchir sur le contenu des évaluations proposées dans les batteries de tests. L'ajout d'une évaluation de la course à pied, évaluation fonctionnelle plus proche des activités sportives, pourrait être une voie d'amélioration du retour au sport. **Ainsi, est-ce qu'une évaluation de la course à pied permettrait de mieux comprendre le lien entre une nouvelle blessure du LCA et de possibles adaptations biomécaniques ?**

Partie II :

Décision de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.

Les publications en lien avec cette partie sont les suivantes :

Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P, Regnaud J-P, Edouard P. Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. *Br J Sports Med* 2018;**52**:1437-1444.

Rambaud AJM, Rossi J, Neri T, Samozino P, Edouard P. Evolution of functional recovery using Hop Tests assessment after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective intensive sport practice cohort study (en soumission).

Nous avons vu précédemment l'importance de la course à pied dans la prise en charge de la reconstruction chirurgicale du LCA, à la fois comme étape dans le continuum de retour aux sports, mais aussi comme moyen / outil de rééducation pour la récupération fonctionnelle du genou opéré et plus largement des membres inférieurs. Cette activité supérieure de marche nécessite, pour être réalisée de façon optimale, des capacités de force, d'élasticité, de pliométrie et de coordination (Lacouture *et al.*, 2013). Son utilisation comme moyen de rééducation devrait donc être un outil pertinent dans l'objectif de développer ces capacités. Cependant, même si lors de la course à pied les contraintes sur le LCA sont faibles (Roldán *et al.*, 2017), elles représentent des contraintes majeures pour l'articulation du genou (Saxby *et al.*, 2016b) qui pourraient faire apparaître un épanchement articulaire réactionnelle. Sa pratique chez le sujet sain est associée à un risque non négligeable de blessure du genou (van Gent *et al.*, 2007). De plus, si le membre inférieur opéré n'a pas encore récupéré toutes ses capacités fonctionnelles, des contraintes articulaires importantes pourraient être néfastes sur la greffe du LCA.

Ainsi, la décision de reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA n'est pas une décision négligeable. Un délai postopératoire minimum est nécessaire pour que l'articulation du genou et les membres inférieurs puissent assumer les contraintes biomécaniques induites par l'activité de la course à pied.

Dans cette 2^{ème} partie de travail de thèse, nous proposons donc de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le temps postopératoire nécessaire pour pouvoir reprendre la course à pied et existe-t-il des critères objectifs pouvant aider à la décision de cette reprise après reconstruction chirurgicale du LCA ? (Partie 2.1)
- Est-ce que l'utilisation de tests fonctionnels, tels que les Hop Tests et leur cinétique de récupération, serait pertinente pour aider à la décision de cette reprise de la course à pied ? (Partie 2.2)
- Quels sont les liens entre la date de reprise de la course à pied et les paramètres biomécaniques de la course à pied lors de la phase de retour au sport après reconstruction du LCA ? (Partie 2.3)

2.1 LES CRITERES DE REPRISE DE LA COURSE A PIED APRES RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA

Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P, Regnaud J-P, Edouard P. Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. Br J Sports Med 2018;**52**:1437-1444.



Résumé et synthèse de l'article

Après reconstruction chirurgicale du LCA, le retour à la course à pied est une étape importante pour le patient en vue d'un retour au sport. Cependant, le passage d'activité peu contraignante pour le genou (vélo, marche) à la course à pied est faiblement évalué et finalement méconnu. Le retour à la course à pied marque donc la transition entre la rééducation et des tâches plus fonctionnelles, donc plus proches du sport. Cependant, il n'existe pas de consensus sur le moment et la façon de le réaliser. Ainsi, cette étude a eu pour objectif de déterminer les critères les plus utilisés dans la littérature scientifique pour autoriser la reprise de la course à pied.

Afin de répondre à cet objectif, nous avons réalisé une revue de littérature spécifique, adaptée à notre question, grâce à une revue exploratoire des pratiques (Arksey and O'Malley, 2005; Colquhoun et al., 2014). Une revue exploratoire des pratiques, ou *scoping review*, est utilisée lorsqu'il n'est pas possible de réaliser une revue systématique répertoriant les études qui répondent à une question de recherche précise. La *scoping review* s'intéresse aux pratiques et habitudes, en essayant d'être le plus large possible dans le champ de la question de recherche, sans analyser la qualité scientifique de l'étude, et faisant un constat des travaux retrouvés. Ainsi lors de la réalisation de cette *scoping review*, les informations portant sur les critères de retour à la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA (critères de temps, clinique, de force et/ou fonctionnel) ont été recueillies dans la partie "méthode" et dans les protocoles de rééducation associés aux études incluses. Nous avons interrogé différentes bases de données : MEDLINE (PubMed), EMBASE, Web of Science, PEDro, SPORTDiscus et la Cochrane Library. Les références bibliographiques des études incluses ont également été analysées. Les critères d'inclusion stipulaient que l'étude reporte au moins un critère autorisant le retour à la course à pied chez le patient adulte ayant bénéficié d'une première reconstruction du LCA. Le protocole de rééducation et le type de chirurgie ont également été analysés.

Il a été inclus 201 études qui reportaient toutes au moins un critère de temps pour le retour à la course à pied (au total 205 critères de temps ont été rapportés), et moins d'une étude sur cinq utilisait des critères additionnels (critères cliniques, de forces, ou fonctionnels) pour cette décision. La médiane du temps de reprise était de 12 semaines postopératoires (Espace Interquartile : 3,3 semaines ; min-max : 5-39 semaines). Les critères additionnels les plus

fréquemment cités étaient : amplitude complète du genou ou supérieure à 95% par rapport au côté controlatéral, une douleur inférieure à 2 à l'échelle visuelle analogique, une symétrie de force isométrique (extenseurs et fléchisseurs) supérieure à 70 %, et un score de symétrie aux Hop Tests supérieur à 70 % (Tableau 2.1.1.).

Tableau 2.1.1. Critères les plus utilisés pour la reprise de la **course à pied** après reconstruction du ligament croisé antérieur.

Critère de temps (délai postopératoire)	- à partir de 3 mois postopératoires
Critères Cliniques	- Douleur <2 sur l'Échelle visuelle analogique - Flexion de genou > à 95 % par rapport au côté controlatéral - Extension complète - Pas d'épanchement articulaire
Critères de Force musculaire	- Force isométrique du quadriceps > à 70 % par rapport au côté controlatéral - Forces du quadriceps et des Ischio-jambiers > à 70 % par rapport au côté controlatéral, évaluées par dynamomètre isocinétique
Critères issus de tests fonctionnels	- Distances réalisées aux Hop Tests (Single and Triple Hop Tests) > à 70 % par rapport au côté controlatéral

Une analyse en sous-groupe (en fonction du protocole rééducatif et de l'évolution des techniques opératoires) a montré l'importance du type de rééducation par rapport à la technique chirurgicale sur le critère de temps (délai postopératoire) : les délais de retour moyen pour la reprise de la course à pied pour les protocoles de rééducation protecteurs étaient entre 21 et 29 semaines suivant la technique chirurgicale, contre 10 et 12 semaines pour les protocoles de rééducation contemporains (Tableau 2.1.2).

En conclusion, bien qu'il n'existait pas un temps postopératoire standard et uniforme, les critères les plus cités étaient le 3^{ème} mois postopératoire, suivi du 2^{ème} et du 4^{ème} mois. Peu d'études mentionnaient l'utilisation de critères additionnels en plus du critère de temps pour décider du retour à la course à pied.

L'unique utilisation d'un critère de temps ne prend cependant pas en compte la variabilité inter-individuelle de la récupération fonctionnelle et de la progression du patient dans le protocole de rééducation. Or, les dernières recommandations internationales (van

Melick et *al.*, 2016) sont en faveur de l'utilisation d'une combinaison de critères objectifs (de score algofonctionnel, de kinesophobia, de score issu des évaluations force musculaire, et de tests fonctionnels ...) pour autoriser la reprise du sport après reconstruction chirurgicale du LCA, et nous avons vu le caractère non négligeable de la course sur le transplant ligamentaire (Roldán et *al.*, 2017). De ce fait, il nous a semblé important que cette décision soit prise en respectant une balance bénéfice / risque en faveur du patient, en s'appuyant aussi sur des critères objectifs. Comme nous l'avons souligné dans cette étude, il semble que les protocoles de rééducation aient eu une influence importante sur le délai de retour à la course à pied. Ainsi, une adaptation des protocoles de rééducation et l'inclusion de batterie de tests donnant des critères objectifs dans ces protocoles pourraient permettre d'aider les praticiens à prendre la décision du retour à la course à pied de manière optimisée et individualisée. Les Hops Tests, tests fonctionnels le plus souvent cités, pourraient être un bon moyen d'individualiser cette décision, car ce sont des tests simples (demandant peu de moyens pour les mettre en application), et reproductibles pour tester les capacités fonctionnelles des membres inférieurs.

Tableau 2.1.2. Analyse en sous-groupe des critères de temps pour la reprise de la course à pied, en fonction du protocole rééducatif (protecteur* ou contemporain‡) et de l'évolution des techniques opératoires (arthrotomie ou arthroscopie).

Temps de reprise de la course à pied (Q1;Q2;Q3 (IQR) [min-max]) en semaines postopératoires			
		Protocoles de rééducation	
		Protecteur *	Contemporain ‡
Techniques chirurgicales	Arthrotomie	19 ; 29 ; 30 (4) [16-39]	6 ; 10 ; 12 (6) [5-12]
	Arthroscopie	16 ; 21 ; 26 (10) [12-32]	9 ; 12 ; 12 (3) [5-24]

* Protocole rééducatif protecteur : Protocole incluant une période postopératoire d'immobilisation par attelle ou plâtre, appui partiel ou absence d'appui du membre opéré, et interdiction d'extension complète active.
‡ Protocole rééducatif contemporain : Protocole incluant une absence de restriction de mobilité articulaire, l'autorisation de l'extension complète et recherche d'une contraction volontaire du quadriceps le plus vite possible.
Q1 :1^{er} quartile, Q2 :médiane, Q3 :3^{ème} quartile, IQR : Inter Quartile Range, min-max : minimum et maximum.

Article en version originale anglaise et ses 2 principales annexes

Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review

Alexandre J M Rambaud,^{1,2} Clare L Ardern,^{3,4} Patricia Thoreux,^{5,6}
Jean-Philippe Regnaud,^{7,8} Pascal Edouard^{1,9}

► Additional material is published online only. To view please visit the journal online (<http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2017-098602>).

¹Inter-University Laboratory of Human Movement Biology (LIBM EA 7424), University of Lyon, University Jean Monnet, Saint Etienne, France

²Physiotherapy Clinic of the Sport Center, La Talaudière, France

³Division of Physiotherapy, Linköping University, Linköping, Sweden

⁴School of Allied Health, La Trobe University, Melbourne, Victoria, Australia

⁵Orthopaedic Department and Sport Medicine Unit, APHP-University Paris, Bobigny, France

⁶Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France

⁷French School of Public Health (EHESP), Paris, France

⁸Inserm U1153, Centre de Recherche Epidémiologie et Statistique Sorbonne Paris Cité (CRESS), Paris, France

⁹Sports Medicine Unit, Department of Clinical and Exercise Physiology, Faculty of Medicine, University Hospital of Saint-Etienne, Saint-Etienne, France

Correspondence to

Alexandre J M Rambaud, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology (LIBM EA 7424), University of Lyon, Saint-Priest en Jarez 42270, France; alexandre.rambaud.kine@gmail.com

Accepted 30 March 2018
Published Online First
2 May 2018



To cite: Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P, et al. *Br J Sports Med* 2018;**52**:1437–1444.

ABSTRACT

Objective To describe the criteria used to guide clinical decision-making regarding when a patient is ready to return to running (RTR) after ACL reconstruction.

Design Scoping review.

Data sources The MEDLINE (PubMed), EMBASE, Web of Science, PEDro, SPORTDiscus and Cochrane Library electronic databases. We also screened the reference lists of included studies and conducted forward citation tracking.

Eligibility criteria for selecting studies Reported at least one criterion for permitting adult patients with primary ACL reconstruction to commence running postoperatively.

Results 201 studies fulfilled the inclusion criteria and reported 205 time-based criteria for RTR. The median time from when RTR was permitted was 12 postoperative weeks (IQR=3.3, range 5–39 weeks). Fewer than one in five studies used additional clinical, strength or performance-based criteria for decision-making regarding RTR. Aside from time, the most frequently reported criteria for RTR were: full knee range of motion or >95% of the non-injured knee plus no pain or pain <2 on visual analogue scale; isometric extensor limb symmetry index (LSI)>70% plus extensor and flexor LSI>70%; and hop test LSI>70%.

Conclusions Fewer than one in five studies reported clinical, strength or performance-based criteria for RTR even though best evidence recommends performance-based criteria combined with time-based criteria to commence running activities following ACL reconstruction.

INTRODUCTION

After ACL reconstruction,^{1–3} an important milestone is returning to running (RTR). The RTR is a key to the participation element of the return to sport continuum (figure 1).² Running places relatively low demands on the knee.⁴ However, RTR marks the beginning of the transition from impairment-focused tasks in early rehabilitation (eg, knee range of motion (RoM) exercises, isometric quadriceps strengthening) to the functional, sport-specific tasks that characterise more advanced rehabilitation (eg, sprinting, pivoting, cutting).^{5,6}

There is a lack of information regarding when the patient can RTR following ACL reconstruction. Steady progress through high-quality rehabilitation influences functional outcomes,⁷ and premature return to sport increases the risk for reinjury.⁸ Conversely, delayed progress may hinder motivation and psychological readiness to return to sport.⁹

Therefore, the aims of this scoping review were: (1) to describe the criteria used in clinical decision-making for RTR after ACL reconstruction; (2) to report how these criteria have changed over time alongside changes in surgical and rehabilitation approaches; and (3) to provide information to help clinicians and patients make quality decisions regarding returning to running after ACL reconstruction.

METHODS

We conducted a scoping review because this approach is superior to a systematic review for addressing an exploratory research question.^{10,11} Systematic reviews aim to facilitate synthesis of a known field of research to answer questions regarding the effectiveness of a specific intervention for a particular problem. In contrast, scoping reviews map key concepts, types of evidence and gaps in the research in a particular field. As for a systematic review, a scoping review involves systematically searching, selecting and synthesising research evidence.¹¹ We followed the methodological framework proposed by Arksey and O'Malley¹⁰ and the Joanna Briggs Institute¹² when conducting and reporting this scoping review.

Our research question was: ‘Which criteria are used to determine when the patient can return to running following primary ACL reconstruction?’

We limited our scoping review to primary ACL reconstruction because the outcomes of revision surgery are typically inferior to the outcomes of primary surgery.^{13,14}

Selection criteria

To select articles for inclusion in this scoping review, the following criteria were employed:

Type of studies

We included: sources of information as recommended in the manual ‘Methodology for JBI Scoping Reviews’¹² (including primary research studies, reviews, systematic reviews, scoping reviews, meta-analyses, guidelines, rehabilitation protocol, cases series, clinical commentaries and technical notes) dealing with human subjects, with a rehabilitation programme reported or including criteria for progression to running or jogging.

Only studies published in English language were included. This restriction was based on findings from systematic reviews suggesting no evidence of bias for conventional medicine if studies written in languages other than English were excluded.^{15,16}



Figure 1 Examples of the three elements of the return to sport (RTS) continuum from Ardern *et al.*² in the specific context of ACL reconstruction.

We excluded: conference abstracts, opinion pieces, magazine and newspaper articles.

Types of participants

We included: studies of skeletally mature patients or people performing physically demanding work with primary ACL reconstruction (autograft, with or without meniscus surgery).

We excluded: studies of patients with knee dislocation, patients undergoing revision ACL reconstruction and studies including only patients who were more than 40 years old at the index ACL reconstruction (middle-aged patients with joint trauma may be more likely to have knee osteoarthritis,^{17 18} and this may influence the contents and progression of rehabilitation).

Types of interventions

We excluded: studies of patients undergoing ACL reconstruction plus major concomitant procedures (eg, articular cartilage surgery, posterior cruciate ligament surgery, lateral or medial collateral ligament surgery). One reason for choosing an allograft is the reduced donor site morbidity compared with autograft harvest.¹⁹ Reduced donor site morbidity may mean that rehabilitation milestones may be different (accelerated) compared with milestones for patients who choose an autograft. Therefore, it is possible that the time criterion for RTR might be different for patients who had an allograft. Excluding studies in which allografts were the sole graft option reduced the potential clinical heterogeneity in the included studies. In addition, since most patients have ACL reconstruction using an autograft,^{20 21} excluding allografts reduced the clinical heterogeneity in the results of our scoping review.

Types of outcomes

We included: clinical outcomes or description of RTR criteria: criteria defined by timeline, questionnaires, impairment assessments, isometric or isokinetic strength assessment, or performance-based assessments.

Study selection

Our search strategy involved a three-step approach²²:

Step 1: initial limited search

We conducted a pilot search (in October 2016) in the MEDLINE and SPORTDiscus electronic databases using the terms ‘anterior cruciate ligament’ AND ‘reconstruction’ AND ‘run’ (online supplementary file A).

Step 2: identify keywords and index terms

We analysed the title, abstract and index terms used to describe the studies identified in step 1 to identify appropriate keywords for inclusion in the final search strategy (online supplementary file B).

Step 3: execution of final search strategy and further searching of references and citations

In November 2016, we searched the MEDLINE (PubMed), EMBASE, Web of Science, PEDro, SPORTDiscus and The Cochrane Library electronic databases using the search strategy we had developed. We also screened the reference lists of included studies, the reference lists of key systematic reviews and narrative reviews, and conducted forward citation tracking using Google Scholar in order to identify any potentially relevant studies that may have been missed in the electronic database search.

All articles were downloaded to the Covidence reference management platform (Covidence, <http://www.covidence.org>), cross-referenced and any duplicates deleted before the selection criteria were applied. Two independent reviewers (AJMR and PE) first screened articles for eligibility based on the title and abstract (figure 1). Then, the full text was screened for inclusion in the scoping review by the same reviewers independently. Any discrepancies were resolved during a consensus meeting. A third reviewer was available if needed, but was not required.

Data extraction

Two reviewers (AJMR and PE) independently extracted data based on the following eight categories:

- Authors and year of publication.
- Origin (country in which the study was conducted).
- Aim(s) of the study.
- Study population (age, sex) and sample size (if applicable).
- ACL reconstruction surgical technique (arthroscopy or open surgery, graft type).
- Rehabilitation protocol: postoperative immobilisation (protective) or no postoperative immobilisation (contemporary).
- Time-based criterion (weeks) from when patients were permitted to commence running activity (jogging or running on a treadmill, jogging or running on the field).
- Other criteria: questionnaire-based or assessment-based criterion or criteria to allow the patient to commence running or jogging (eg, clinical assessment, isometric strength assessment, isokinetic strength assessment, functional goal-based assessment (performance-based assessment)).

To define if a rehabilitation protocol was protective or contemporary,²³ we made a judgement based on the early rehabilitation phase: *Protective rehabilitation protocols* were characterised by a period of postoperative time where knee RoM was controlled (eg, with a cast), non-weightbearing or only toe-touch weightbearing and avoidance of active quadriceps in terminal extension.^{24 25} *Contemporary rehabilitation protocols* were characterised by no restrictions on mobilisation,²⁵⁻²⁷ encouragement of full active knee extension RoM, quadriceps activation and early weightbearing.

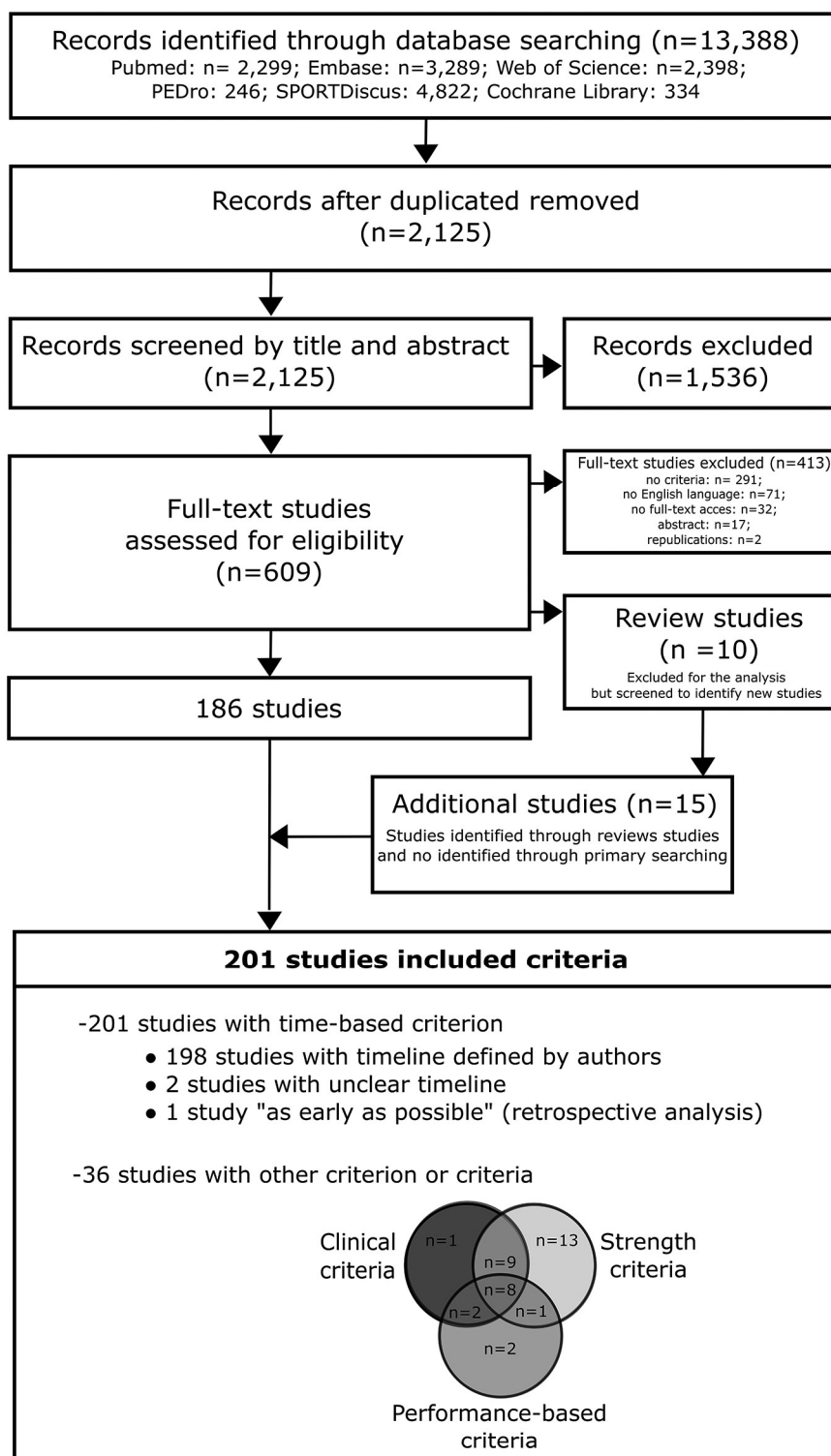


Figure 2 Flow chart of the study selection process.

Assessment of risk of bias

Since we made a descriptive analysis of variables representing choice and habits of the authors of included studies and not the results of an intervention administered to a population, we contend that our descriptive summary is unlikely to be adversely influenced by the internal validity of included studies. Therefore, we did not evaluate the internal validity of included studies.

Data management

Data were summarised and tabulated according to the eight data extraction categories (online supplementary file C). Qualitative variables were described by number (n) and percentage (%). As there is no consensus in the terms used to describe RTR, and given the variety of terms found in the pilot search, time-based criteria were described by median and IQR to ensure that results were not influenced by outliers.

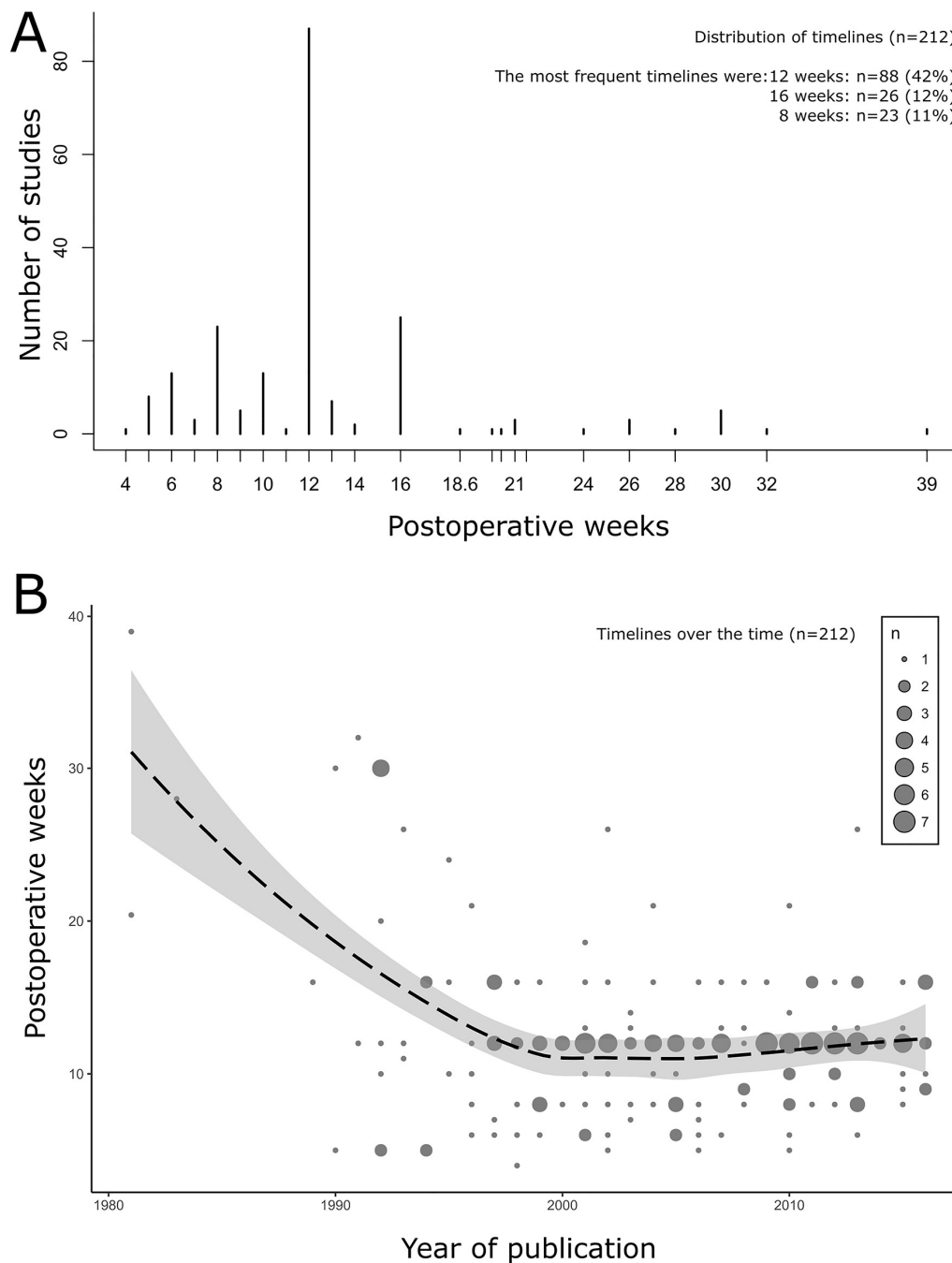


Figure 3 Distribution of time to permit return to running (RTR) (A) and timelines over the years (B) (n=212) from studies included in the scoping review (n=198), with non-linear regression and CI (95%) representing the time-based criteria trend of the authors during recent years.

If a study compared two protocols with different time-based criteria or other criteria, all criteria were included in the summary. If a study reported the time to RTR, the median or the average was included in the analysis. We also assessed if there was a change over time in the time-based criterion by using a non-linear Local Regression with 95% CI (span=0.75, two degrees of polynomials). To be as exhaustive as possible, we retained open and arthroscopic surgical procedures and all rehabilitation approaches (dichotomised as protective or contemporary rehabilitation). Medians and IQR were calculated for the four groups (open surgery, arthroscopic surgery, protective rehabilitation and contemporary rehabilitation). Analyses were performed using the software R (<http://www.R-project.org>).

RESULTS

The flow chart of study selection is detailed in [figure 2](#) (lists of excluded articles are presented in online supplementary files D and E). We selected and included 201 studies in our scoping review ([figure 2](#)).

Time-based criteria used to clear the patient to RTR following ACL reconstruction

Among the 201 studies reporting information on time-based criteria, 198 (99%) reported in the methods or in the rehabilitation programme a time from which RTR was permitted, 2 studies (1%) were unclear^{5,28} and 1 study made a retrospective analysis of the timeline.²⁹ Since 13 studies included two groups

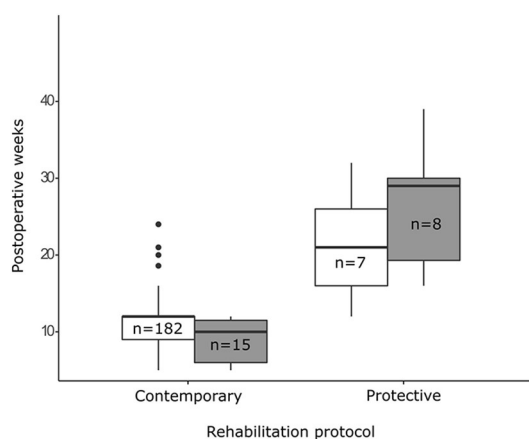


Figure 4 Box plot of the distribution of timeline of the two types of surgery (open surgery represented by grey boxes, arthroscopic surgery represented by white boxes) with the type of protocol of rehabilitation, including the number (n) with reported timelines for each group.

with a different timeline, a total of 212 timelines were included in the statistical analysis.

The median time from which RTR was permitted was 12 postoperative weeks (IQR=3.3, range 5–39 weeks) (figure 3A). The criteria used over time are presented in figure 3B with the non-linear regression curve and the 95% CI.

In the subgroup ‘open surgery plus protective rehabilitation’, the median time for RTR was 29 weeks (IQR=10.7 weeks). For the ‘arthroscopic surgery plus protected rehabilitation’ subgroup, the median time for RTR was 21.0 weeks (IQR=10.0 weeks). There was no difference in the median time for RTR between open surgery and arthroscopic surgery when a contemporary rehabilitation protocol was employed (open surgery plus contemporary rehabilitation: 10 weeks, IQR=3.3 weeks; arthroscopic surgery plus contemporary rehabilitation: 12 weeks, IQR=3.0 weeks) (figure 4).

Assessment-based criteria for decision-making for RTR following ACL reconstruction

Thirty-six studies (18% of 201) reported using specific criteria to clear patients to RTR after ACL reconstruction. Sixteen studies (8% of 201) reported using a single criterion (clinical, strength or performance-based criterion), 12 studies (6% of 201) reported using two types of criteria and eight studies (4% of 201) reported using all three types of criteria (figure 2).

Clinical criteria and questionnaires

Twenty studies (10% of 201) reported using clinical criteria (table 1). The most common criteria were: knee flexion RoM (n=14), knee effusion (n=10) and pain (n=10). The most quantifiable and reproducible criteria used were full knee RoM or RoM greater than 95% of the non-injured knee (n=10), and pain <2 on visual analogue scale (n=9).

Strength criteria

Thirty studies (15% of 201) reported using strength criteria. Eleven used an isometric test criterion, 11 used an isokinetic test criterion and two used isometric and isokinetic test criteria (table 2).^{27–30} The most common objective criteria were isometric quadriceps limb symmetry index (LSI; calculated by dividing the operated limb score by the non-operated limb score) >80% (n=3) and isokinetic quadriceps and hamstrings LSI>70% (n=4) (table 2).

Table 1 Clinical criteria and questionnaire scores used for return to running

Questionnaire score (n (%))	2 (1%)
Self-report knee scoring	2
Modified Noyes system ≥ 90 ⁴⁶	1
International Knee Documentation Committee subjective knee form >70 ⁵	1
Clinical criteria (n (%))	20 (10%)
Knee flexion range of motion (RoM)	14 (7%)
RoM>95% of the other side or full range of motion ^{28 38–40 46–50 61}	10 (5%)
RoM>120° ^{24 41}	2 (1%)
RoM>100° ^{42 43}	2 (1%)
Effusion	10 (5%)
No effusion ^{24 28 43–45 49}	6 (3%)
Effusion of trace or less ^{6 39–41}	4 (2%)
Pain	10 (5%)
No pain or <2/10 on visual analogue scale ^{24 28 38–45}	10 (5%)
Knee extension RoM	6 (3%)
Full RoM ^{39–42 47 50}	6 (3%)
Clinical examination (others)	5 (3%)
Satisfactory clinical examination ^{46 59 62}	3 (1%)
‘... no inflammation...’ ⁶¹	1 (0.5%)
No evidence of patellofemoral symptoms ²⁸	1 (0.5%)
Graft evaluation	4 (2%)
Negative pivot shift and no postsurgical history of giving way ^{28 45}	2 (1%)
Anterior translation <0.5 mm ^{62 59}	2 (1%)
Ambulation	2 (1%)
Full weightbearing ambulation ^{41 42}	2 (1%)

Performance-based criteria

Thirteen studies (6% of 201) reported using performance-based criteria: balance criteria (n=6), normal gait pattern during walking or jog-in-place (n=5), or functional tests (n=7) (table 3). The objective criteria used were proprioception LSI of 100%, composite score on Y-balance test >90%, functional test LSI>70%, hop test LSI>85%, and two combined tests as 10 consecutive single-leg squats to 45° knee flexion without loss of balance, and 30 step-up-and-holds without loss of balance or excessive motion outside of the sagittal plane (table 3).

DISCUSSION

In this scoping review that included 201 articles, time was the most frequently reported criterion for clearing patients to RTR after primary ACL reconstruction. The median time for clearance to RTR was 12 postoperative weeks (IQR=3.3, range 5–39 weeks). The time criterion for RTR has changed over the years mirroring changes in rehabilitation approaches. Fewer than one in five studies reported clinical, strength or performance-based criteria for RTR, the most frequently reported being: full knee RoM or >95% of the non-injured knee; pain <2 on visual analogue scale; isometric lower limb strength LSI>70%; isokinetic quadriceps and hamstring strength LSI>70%; and hop test LSI>70%.

Time-based criteria for RTR must respect biological healing of the ACL graft

All included studies used at least a time-based criterion for RTR after ACL reconstruction. The median was 12 weeks (IQR=3.25), although there were three arbitrary time points reported in 65% of included studies (figure 3A): 8 weeks (11%

Review

Table 2 Strength criteria used for return to running

Strength criteria (n (%))	30 (15%)
Isometric test criteria (studies, n)	13 (6%)
LSI>60% ^{39 40}	2 (1%)
LSI>65% ³⁰	1
LSI>70% ^{26 28 54} ('isometric leg press testing') ⁷⁰	4 (3%)
LSI>85% ⁴³	1 (0.5%)
Quadriceps LSI>60% ⁴⁰	1 (0.5%)
Quadriceps LSI>70% ⁴²	1 (0.5%)
Quadriceps LSI>75% ³³	1 (0.5%)
Quadriceps LSI>80% ^{6 47 50}	3 (2%)
Isotonic test criteria (studies, n)	2 (1%)
LSI>50% (with 'Push strength on the leg press', n=1) ³⁹	1
LSI>80% ('1-repetition maximum on the leg press (90-0°)', n=1) ³⁴	1
Isokinetic test criteria (studies, n)	13 (6%)
Hamstrings:quadriceps ratio between 60% and 70% ⁷¹	1
Quadriceps LSI>80%, hamstrings LSI>110%, quadriceps torque/BW ratio >55%, hamstrings:quadriceps ratio >70% ⁴⁶	1
Quadriceps and hamstrings LSI>65% ^{30 45 72}	3 (2%)
Quadriceps and hamstring LSI>70% ^{25 55 56 70}	4 (2%)
Quadriceps and hamstring LSI>75% ²⁴	1
Quadriceps torque/BW ratio at 300°/s: (>40% (men) and >30% (women)) and quadriceps torque/BW ratio at 180°/s: (>60% (men) and >50% (women)) ⁵	1
'...satisfactory isokinetic test...' ^{59 62}	2 (1%)
Other subjective or unclear criteria (studies, n)	6 (3%)
'Good manual strength test' ^{38 49}	1
'...Lift 15 lbs during short arc quadriceps exercise...' ⁷¹	1
'Good muscle strength and control' (...when muscle strength and control allow...) ⁷³	1
'...Sufficient musculature...' ⁷⁴	1
'...Good quadriceps contraction in extension...' ⁴¹	1

BW, body weight; LSI, limb symmetry index.

of included studies), 12 weeks (42% of included studies) and 16 weeks (12% of included studies).

These three arbitrary time points might reflect different rehabilitation goals. Early RTR (ie, around 8 postoperative weeks) might reflect a focus on early return to sport. In contrast, late

Table 3 Performance-based criteria used for the return to running

Performance-based criteria (n (%))	13 (7%)
Balance (studies, n)	6 (3%)
One balance exercise with good control without objective criteria ⁴¹	4 (2%) ^{43 59 60}
Proprioception test LSI=100% ⁴⁶	1
Composite score on Y-balance test $\geq 90\%$ ³⁴	1
Gait pattern (studies, n)	5 (3%)
Normal gait pattern ^{28 34 44 47 50}	5 (3%)
Functional test (studies, n)	7 (4%)
Functional test LSI>70% ^{59 62}	2 (1%)
Hop tests LSI $\geq 85\%$ ⁴⁶	1
Hop tests or vertical jump tests without criteria ⁶¹	1
Jog on a minitrampoline for 10 min without problems ⁶³	1
10 consecutive single-leg squats to 45° knee flexion without loss of balance, and 30 steps-and-holds without loss of balance or excessive motion outside of the sagittal plane ³⁴	1
Ability to perform single-limb functional exercises without pain or swelling ⁴⁴	1

LSI, limb symmetry index.

RTR (ie, around 16 postoperative weeks) might reflect a focus on protecting the healing ACL graft.

While our understanding of graft healing timelines in humans is limited,³¹ the ACL graft may undergo substantial change in mechanical properties during the period from 8 to 16 postoperative weeks.^{31 32} There is also wide variation in strength and functional recovery during this time.³³⁻³⁵ Therefore, there are likely different risks to the ACL graft and different capacities among patients to resume running. Collectively, these facts underscore the need for high-quality individualised rehabilitation and decision-making regarding rehabilitation progression—there is no one-size-fits-all recipe.³⁶

Clinical criteria are important indicators of adequate loading when returning to running

Fewer than one in every five studies included in this scoping review reported information regarding assessment-based criteria (ie, clinical tests, strength tests, performance tests) used to guide decision-making regarding RTR. This might suggest that many authors consider time a sufficient sole criterion for RTR. On the other hand, it might also suggest there are few reliable and valid criteria for RTR. Only one in every 10 studies reported clinical criteria—the most frequently reported were knee RoM, effusion and pain. Current evidence-based rehabilitation guidelines for ACL reconstruction³⁷ recommend patients have no effusion, active knee extension RoM of at least 0° and normalised gait pattern to progress from early impairment-based rehabilitation to the second phase (heavy strength training, neuromuscular training and sport-specific training). It is possible that abnormal clinical examination was considered a contraindication to commence running (and simply not reported in the published article), and this might explain why there was a low proportion of studies citing clinical criteria for RTR.

We suggest that these clinical criteria: pain <2 on visual analogue scale,^{24 28 38-45} 95% knee flexion RoM,^{28 38-40 46-51} full extension RoM (0° knee extension),^{39-42 47 50} no effusion/trace of effusion,^{6 24 28 39-41 43-45 49} should be used as 'non-negotiable' clinical milestones for RTR—patients must fulfil these criteria before RTR as a way to ensure adequate loading. The knee must have sufficient capacity, first to cope with the demands of activities of daily living and rehabilitation, before commencing higher level functional tasks including running. Therefore, a symptomatic knee (that may be characterised by an increase in pain, effusion and RoM restrictions) after walking, strengthening and/or sensorimotor control exercises suggests inferior load management. In this case, delaying RTR is appropriate, irrespective of the postoperative time.

Strength and performance-based criteria are relevant parameters to judge the patient's capacity to RTR

Strength was the most frequently reported category of RTR criteria (n=31, 16%). Since the hamstring and quadriceps have an important role in the active stabilisation of the knee⁵² and in motor control strategy,⁵³ it seems reasonable to include strength criteria in RTR decision-making. Adequate quadriceps strength and hamstrings strength are also important criteria for safe return to sport decision-making.^{51 52} The most frequent recommendations for the strength evaluation for RTR were: (1) isometric assessment: an LSI of lower limb >70%^{26-28 54} and quadriceps LSI>80%^{6 34 47 50}; (2) for isokinetic assessment: quadriceps and hamstrings LSI>70%.^{25 27 55 56}

Only 17 articles (7%) used performance-based criteria for clearance to RTR, despite the fact that running represents a

functional progression from the impairments that early rehabilitation focuses on addressing.^{2 57 58} Equally, despite the fact that adequate postural control and normal gait pattern are important precursors for RTR,^{28 34 41 43 44 47 50 59 60} there was no assessment of gait reported in the included articles. For example, walking with a gait deviation might suggest inferior load management, and alert the clinician that the patient may not be ready to RTR.

Functional tests replicating some of the physical requirements for running may include hop tests performed with a controlled and balanced landing.^{46 59 61 62} Other functional tests, such as single-limb squats at 45° knee flexion, performed without loss of balance and without dynamic knee valgus, or step-up-and-holds,³⁴ may also be appropriate tests for determining whether the patient is ready to RTR. These tests, described with precise instructions about the quality of the knee flexion (without knee valgus), are simple tests, require little equipment and have the advantage of doubling as rehabilitation exercises. Balance tests that aim to assess aspects of movement quality (eg, Y-balance test and modified Star Excursion Balance Test)³⁴ may also provide information regarding movement control that is relevant for RTR, and complements the other tests mentioned previously.

Quality of movement performance is equally as important as quantity, and performance-based tests allow the clinician to assess both aspects. This information is useful for decision-making regarding RTR, and for further progressions during rehabilitation (eg, commencing sport-specific training). Therefore, it seems reasonable to suggest that quality decision-making regarding functional progressions in rehabilitation (including RTR) should be individualised and based on a test battery comprising multiple criteria including function, strength and time.³⁷ Frequent functional testing, using a range of different tests, that starts early in the rehabilitation process, characterises high-quality rehabilitation.³⁶ This information provides important feedback to the clinician that can be subsequently used to target specific deficits and make changes, as necessary, in a timely way. Clinicians are not clairvoyants—without regular assessment, it is impossible to know whether the planned rehabilitation is high quality and appropriate for the individual patient.

We suggest that the clinician consider for strength and performance-based criteria: hamstring LSI and quadriceps LSI > 70% evaluated by isometric assessments, and hop test LSI > 70%. The addition of a single-leg squat or step-up assessment performed without increase in knee valgus may also be considered. Further research is needed to help guide the clinician regarding which combination of strength and performance-based criteria should be used to assess whether the patient is ready to RTR.

Brace or no brace to RTR?

Only six of the 201 included studies^{63–68} compared outcomes between patients who did and did not wear a brace during postoperative rehabilitation. In five of these studies, RTR was permitted at the same time for all patients, irrespective of whether they wore a brace or not (7 weeks,⁶³ 12 weeks,^{64 65 68} or 16 weeks⁶⁶ postoperative). In one study, patients who did not wear a brace during postoperative rehabilitation commenced running earlier than patients who wore a brace (10 weeks vs 12 weeks).⁶⁷ However, it is important to note that these timelines for RTR were reported as part of the rehabilitation programme, not as a result of a statistical comparison. This suggests the time criteria reported reflected clinical decision-making by the respective researchers. We hypothesise that postoperative bracing does not influence RTR. However, a randomised controlled trial is necessary to test this hypothesis.

When is it safe to RTR?

Unsurprisingly, we found that the time criterion for RTR was different depending whether a protective or contemporary rehabilitation protocol was employed. With contemporary rehabilitation, patients were permitted to commence running earlier than in protective programmes (where there was a period of postoperative immobilisation). This suggests RTR is—at least to some degree—tied to expectations of underlying physical capacity to meet the demands of running. Few studies used multiple criteria in addition to the time criterion for RTR, suggesting that there is no standard assessment for this key step in the return to sport continuum.

A missing piece of information is whether RTR at a median 12 weeks postoperative is safe. It is unclear how many patients had exacerbations of symptoms, or sustained new knee injuries. This information is important to guide clinical expectations and adequate loading for the individual. To answer the question ‘Is RTR at a median 12 postoperative weeks safe?’, research designs that incorporate physical activity/rehabilitation exposure, objective assessments (clinical, strength and performance based) and injury (either new acute injuries or gradual-onset injuries) registration are needed.

Methodological considerations

In line with scoping review methodology, we did not impose date limits on our search or article inclusion. Therefore, we have included articles where surgical and rehabilitation approaches may be different from contemporary clinical practice. We felt it was important to cover the breadth of clinical practice, including how practice has changed over time. We accounted for this in our descriptive synthesis by differentiating between the surgical techniques (open surgery vs arthroscopic surgery) and the rehabilitation protocols (protective vs contemporary rehabilitation protocols).

Differences in how studies defined RTR could influence our results. Not all authors used the same terms to describe the running activity (eg, running, jogging, slow running, and so on). The use of the term ‘running’ may have different meanings in different articles, and a conceptual definition of a specific term to describe the resumption of running may be important for future research. We propose the term return-to-running activities to describe the phase of RTR at a slow speed (8–10 km/hour), but it may be relevant to establish consensus on the definition of the term ‘running’. Since authors report general criteria that governed rehabilitation progression, our analysis of the time-based criteria reflects a general time frame, instead of the precise time each patient was permitted to RTR in each study.

One study reported a rehabilitation protocol that included using restricted body weight progression to running.⁶⁹ New technologies (eg, anti gravity treadmill) may provide the clinician with alternative ways to progressively increase loading during RTR. These technologies might have merit in facilitating adequate loading that enables the patient to commence running earlier. However, it is unclear whether these approaches translate to earlier progression through rehabilitation, and this might be an avenue for future research.

Clinical implications

RTR decision-making should be individualised for each patient. No universal timeline to RTR exists. For many patients, it might be reasonable to expect readiness to RTR around the 8th–16th postoperative weeks, provided there is adequate loading; pain < 2 on visual analogue scale, 95% knee flexion RoM, full

knee extension RoM and no effusion. The clinician may choose to use a battery of tests for individualised clinical decision-making regarding RTR including (1) strength tests, (2) qualitative performance-based assessments, with focus on dynamic knee control, and (3) quantitative performance-based assessments such as hop tests. However, it is unclear whether these time-based and assessment-based criteria relate to safe RTR.

CONCLUSION

In this scoping review including 201 studies from 1981 to 2016, time was the most frequently reported criterion for RTR and fewer than one in five studies reported clinical, strength or performance-based criteria for RTR. It seems reasonable to recommend performance-based criteria combined with time-based criteria to commence running activities following ACL reconstruction.

What are the new findings?

- ▶ Only one in five studies reported clinical, strength or performance-based criteria for return to running (RTR).
- ▶ The most cited time-based criterion for RTR was 12 postoperative weeks.
- ▶ An approach combining assessment goal-based criteria with time-based criteria is a reasonable approach for RTR after ACL reconstruction.

Correction notice This article has been updated since it was published Online First. The title has been corrected in order to fix a grammatical error.

Acknowledgements The authors acknowledge and thank Thomas Davergne for his contribution to the help in the searches in the database.

Contributors All authors have contributed to the development of the research questions and study design. AJMR, PE and JPR identified the method of the scoping protocol. AJMR and PE developed and conducted the search strategy and data extraction. All authors developed the first and subsequent drafts of the manuscript. All authors reviewed and approved the manuscript.

Funding The authors have not declared a specific grant for this research from any funding agency in the public, commercial or not-for-profit sectors.

Competing interests None declared.

Patient consent Not required.

Provenance and peer review Not commissioned; externally peer reviewed.

© Article author(s) or their employer(s) unless otherwise stated in the text of the article) 2018. All rights reserved. No commercial use is permitted unless otherwise expressly granted.

REFERENCES

- 1 Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, *et al.* 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. *Br J Sports Med* 2014;48:1543–52.
- 2 Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, *et al.* 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med* 2016;50:853–64.
- 3 Rambaud AJM, Semay B, Samozino P, *et al.* 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* 2017;7:e015087.
- 4 Takeda K, Hasegawa T, Kiriya Y, *et al.* Kinematic motion of the anterior cruciate ligament deficient knee during functionally high and low demanding tasks. *J Biomech* 2014;47:2526–30.
- 5 Myer GD, Paterno MV, Ford KR, *et al.* Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: criteria-based progression through the return-to-sport phase. *J Orthop Sports Phys Ther* 2006;36:385–402.
- 6 Adams D, Logerstedt DS, Hunter-Giordano A, *et al.* Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:601–14.
- 7 Grindem H, Granan LP, Risberg MA, *et al.* How does a combined preoperative and postoperative rehabilitation programme influence the outcome of ACL reconstruction 2 years after surgery? A comparison between patients in the Delaware-Oslo ACL Cohort and the Norwegian National Knee Ligament Registry. *Br J Sports Med* 2015;49:385–9.
- 8 Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, *et al.* 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. *Br J Sports Med* 2016;50:946–51.
- 9 Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, *et al.* Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Am J Sports Med* 2013;41:1549–58.
- 10 Arksey H, O'Malley L. Scoping studies: towards a methodological framework. *Int J Soc Res Methodol* 2005;8:19–32.
- 11 Colquhoun HL, Levac D, O'Brien KK, *et al.* Scoping reviews: time for clarity in definition, methods, and reporting. *J Clin Epidemiol* 2014;67:1291–4.
- 12 The Joanna Briggs Institute. *Joanna Briggs Institute Reviewers' Manual*. 2015 edn. Adelaide, South Australia: The Joanna Briggs Institute, 2015.
- 13 Anand BS, Feller JA, Richmond AK, *et al.* Return-to-sport outcomes after revision anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Am J Sports Med* 2016;44:580–4.
- 14 Grassi A, Zaffagnini S, Marcheggiani Muccioli GM, *et al.* After revision anterior cruciate ligament reconstruction, who returns to sport? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2015;49:1295–304.
- 15 Morrison A, Moulton K, Clark M, *et al.* English-language restriction when conducting systematic review-based metaanalyses: Systematic review of published studies. Ottawa: Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, 2009.
- 16 Moher D, Pham B, Lawson ML, *et al.* The inclusion of reports of randomised trials published in languages other than English in systematic reviews. *Health Technol Assess* 2003;7:1–90.
- 17 Horváth G, Koroknai G, Ács B, *et al.* Prevalence of radiographic primary hip and knee osteoarthritis in a representative Central European population. *Int Orthop* 2011;35:971–5.
- 18 Driban JB, Eaton CB, Lo GH, *et al.* Association of knee injuries with accelerated knee osteoarthritis progression: data from the Osteoarthritis Initiative. *Arthritis Care Res* 2014;66:1673–9.
- 19 Duchman KR, Lynch TS, Spindler KP. Graft selection in anterior cruciate ligament surgery: who gets what and why? *Clin Sports Med* 2017;36:25–33.
- 20 Andersson D, Desai N, Björnsson H, *et al.* Patient predictors of early revision surgery after anterior cruciate ligament reconstruction: a cohort study of 16,930 patients with 2-year follow-up. *Am J Sports Med* 2015;43:121–7.
- 21 Kaeding CC, Aros B, Pedroza A, *et al.* Allograft versus autograft anterior cruciate ligament reconstruction: predictors of failure from a moon prospective longitudinal cohort. *Sports Health* 2011;3:73–81.
- 22 Murray A, Daines L, Archibald D, *et al.* The relationship and effects of golf on physical and mental health: a scoping review protocol. *Br J Sports Med* 2016;50:647–50.
- 23 De Carlo MS, McDivitt R. Rehabilitation of patients following autogenic bone-patellar tendon-bone ad reconstruction: a 20-year perspective. *N Am J Sports Phys Ther* 2006;1:108–23.
- 24 Paulos L, Noyes FR, Grood E, *et al.* Knee rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction and repair. *Am J Sports Med* 1981;9:140–9.
- 25 Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 1990;18:292–9.
- 26 Shelbourne KD, Klootwyk TE, Decarlo MS. Update on accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 1992;15:303–8.
- 27 Decarlo MS, Shelbourne KD, McCarroll JR, *et al.* Traditional versus accelerated rehabilitation following ACL reconstruction: a one-year follow-up. *J Orthop Sports Phys Ther* 1992;15:309–16.
- 28 Yabroudi MA, Irrgang JJ. Rehabilitation and return to play after anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Sports Med* 2013;32:165–75.
- 29 Sauter AJ, van Haef MJ, van der Lubbe N, *et al.* Anterior cruciate ligament reconstruction with alternative tibial tunnel: early results after accelerated weight-bearing. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1998;6:220–3.
- 30 Muneta T, Sekiya I, Ogiuchi T, *et al.* Effects of aggressive early rehabilitation on the outcome of anterior cruciate ligament reconstruction with multi-strand semitendinosus tendon. *Int Orthop* 1998;22:352–6.
- 31 Claes S, Verdonk P, Forsyth R, *et al.* The "ligamentization" process in anterior cruciate ligament reconstruction: what happens to the human graft? A systematic review of the literature. *Am J Sports Med* 2011;39:2476–83.
- 32 Scheffler SU, Unterhauser FN, Weiler A. Graft remodeling and ligamentization after cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008;16:834–42.
- 33 Bizzini M, Gorelick M, Munzinger U, *et al.* Joint laxity and isokinetic thigh muscle strength characteristics after anterior cruciate ligament reconstruction: bone patellar tendon bone versus quadrupled hamstring autografts. *Clin J Sport Med* 2006;16:4–9.
- 34 Joreitz R, Lynch A, Rabuck S, *et al.* Patient-specific and surgery-specific factors that affect return to sport after ACL reconstruction. *Int J Sports Phys Ther* 2016;11:264–78.
- 35 Lepley LK, Wojtyś EM, Palmieri-Smith RM. Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function post-ACL reconstruction. *Knee* 2015;22:270–7.

- 36 Grindem H, Risberg MA, Eitzen I. Two factors that may underpin outstanding outcomes after ACL rehabilitation. *Br J Sports Med* 2015;49:1425.
- 37 van Melick N, van Cingel RE, Brooijmans F, et al. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med* 2016;50:1506–15.
- 38 Hackney JM, Wade MG, Larson C, et al. Impairment in people with anterior cruciate ligament reconstruction in adjusting ground reaction force in running. *Physiother Theory Pract* 2010;26:289–96.
- 39 Lentz TA, Zeppieri G, Tillman SM, et al. Return to preinjury sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: contributions of demographic, knee impairment, and self-report measures. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:893–901.
- 40 Lentz TA, Zeppieri G, George SZ, et al. Comparison of physical impairment, functional, and psychosocial measures based on fear of reinjury/lack of confidence and return-to-sport status after ACL reconstruction. *Am J Sports Med* 2015;43:345–53.
- 41 Waters E. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: basketball. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:326–36.
- 42 Fitzgerald GK, Piva SR, Irrgang JJ. A modified neuromuscular electrical stimulation protocol for quadriceps strength training following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2003;33:492–501.
- 43 Manske RC, Prohaska D, Lucas B. Recent advances following anterior cruciate ligament reconstruction: rehabilitation perspectives: critical reviews in rehabilitation medicine. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2012;5:59–71.
- 44 Sigward SM, Lin P, Pratt K. Knee loading asymmetries during gait and running in early rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a longitudinal study. *Clin Biomech* 2016;32:249–54.
- 45 DeMaio M, Mangine RE, Noyes FR, et al. Advanced muscle training after ACL reconstruction: weeks 6 to 52. *Orthopedics* 1992;15:757–67.
- 46 Wilk KE, Arrigo C, Andrews JR, et al. Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in the female athlete. *J Athl Train* 1999;34:177–93.
- 47 Manal TJ, Snyder-Mackler L. Practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation: a criterion-based rehabilitation progression. *Oper Tech Orthop* 1996;6:190–6.
- 48 Anderson JL, Lamb SE, Barker KL, et al. Changes in muscle torque following anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between hamstrings and patella tendon graft procedures on 45 patients. *Acta Orthop Scand* 2002;73:546–52.
- 49 Taylor DC, DeBerardino TM, Nelson BJ, et al. Patellar tendon versus hamstring tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial using similar femoral and tibial fixation methods. *Am J Sports Med* 2009;37:1946–57.
- 50 Hartigan EH, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Time line for noncopers to pass return-to-sports criteria after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2010;40:141–54.
- 51 Amano K, Li Q, Ma CB. Functional knee assessment with advanced imaging. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2016;9:123–9.
- 52 Tourville TW, Jarrell KM, Naud S, et al. Relationship between isokinetic strength and tibiofemoral joint space width changes after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2014;42:302–11.
- 53 Decker LM, Moraiti C, Stergiou N, et al. New insights into anterior cruciate ligament deficiency and reconstruction through the assessment of knee kinematic variability in terms of nonlinear dynamics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19:1620–33.
- 54 Czamara A. Moments of muscular strength of knee joint extensors and flexors during physiotherapeutic procedures following anterior cruciate ligament reconstruction in males. *Acta Bioeng Biomech* 2008;10:37–44.
- 55 Karasel S, Akpınar B, Gülbahar S, et al. Clinical and functional outcomes and proprioception after a modified accelerated rehabilitation program following anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft. *Acta Orthop Traumatol Turc* 2010;44:220–8.
- 56 Lemiesz G, Lemiesz E, Wolosewicz M, et al. The effectiveness of rehabilitation procedure after the reconstruction of the anterior cruciate ligament according to the Norwegian protocol. *Pol Ann Med* 2011;18:82–95.
- 57 Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, et al. Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;25:192–9.
- 58 Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, et al. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2016;50:804–8.
- 59 Wilk KE, Andrews JR. Current concepts in the treatment of anterior cruciate ligament disruption. *J Orthop Sports Phys Ther* 1992;15:279–93.
- 60 Risberg MA, Holm I, Myklebust G, et al. Neuromuscular training versus strength training during first 6 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *Phys Ther* 2007;87:737–50.
- 61 Fu FH, L-Y Woo S, Irrgang JJ. Current concepts for rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 1992;15:270–8.
- 62 Wilk KE, Reinold MM, Hooks TR. Recent advances in the rehabilitation of isolated and combined anterior cruciate ligament injuries. *Orthop Clin North Am* 2003;34:107–37.
- 63 Feller J, Bartlett J, Chapman S, et al. Use of an extension-assisting brace following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1997;5:6–9.
- 64 Kartus J, Stener S, Köhler K, et al. Is bracing after anterior cruciate ligament reconstruction necessary? A 2-year follow-up of 78 consecutive patients rehabilitated with or without a brace. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1997;5:157–61.
- 65 Brandsson S, Faxén E, Kartus J, et al. Is a knee brace advantageous after anterior cruciate ligament surgery? A prospective, randomised study with a two-year follow-up. *Scand J Med Sci Sports* 2001;11:110–4.
- 66 Henriksson M, Rockborn P, Good L. Range of motion training in brace vs. plaster immobilization after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective randomized comparison with a 2-year follow-up. *Scand J Med Sci Sports* 2002;12:73–80.
- 67 Hasan HA. Tegner and Lysholm scores in brace-free rehabilitation. *Saudi Med J* 2004;25:1962–6.
- 68 Vadalà A, Iorio R, De Carli A, et al. The effect of accelerated, brace free, rehabilitation on bone tunnel enlargement after ACL reconstruction using hamstring tendons: a CT study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2007;15:365–71.
- 69 Wilk KE, Macrina LC, Cain EL, et al. Recent advances in the rehabilitation of anterior cruciate ligament injuries. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:153–71.
- 70 De Carlo MS, Sell KE, Shelbourne KD, et al. Current concepts on accelerated ACL rehabilitation. *J Sport Rehabil* 1994;3:304–18.
- 71 Seto JL, Brewster CE, Lombardo SJ, et al. Rehabilitation of the knee after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 1989;11:8–18.
- 72 Souissi S, Wong delP, Dellal A, et al. Improving functional performance and muscle power 4-to-6 months after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Sports Sci Med* 2011;10:655–64.
- 73 Bollen SR. BASK Instructional Lecture 3: rehabilitation after ACL reconstruction. *Knee* 2001;8:75–7.
- 74 Gorschewsky O, Klakow A, Riechert K, et al. Clinical comparison of the Tutoplast allograft and autologous patellar tendon (bone-patellar tendon-bone) for the reconstruction of the anterior cruciate ligament: 2- and 6-year results. *Am J Sports Med* 2005;33:1202–9.

Supplementary file A

INITIAL LIMITED SEARCH

An initial limited search (October 2016) of MEDLINE and SPORTDiscus was conducted. The search terms used were ‘Anterior Cruciate Ligament’ AND ‘Reconstruction’ AND ‘run’. All 33 studies identified by MEDLINE and 17 by SPORTDiscus were reviewed. After duplicates removed (n=7), 13 studies in total proved relevant regarding our study aim.

We analyzed the title, abstract and index terms used to describe these 13 studies identified in step 1 to identify key words. The research team identified for ‘Anterior cruciate ligament’ 2 terms: ‘anterior cruciate ligament’ and ‘ACL’. For ‘Reconstruction’, 3 terms were identified: ‘reconstruction’, ‘graft’ and ‘replacement’. For ‘Run’, 6 terms were identified: ‘run’, ‘running’, ‘jog’, ‘jogging’, ‘light activities’ and ‘light activity’.

Supplementary file B

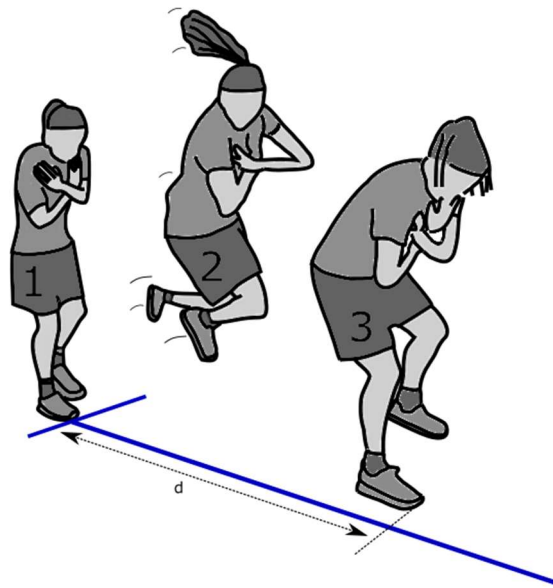
RESEARCH IN DIFFERENT DATA BASES

The 6th November 2016

Pubmed	((anterior AND cruciate AND ligament AND reconstruction) OR anterior cruciate ligament reconstruction OR (acl AND (graft OR replacement OR reconstruction))) AND (search AND light activities OR light activity OR joggin* OR jogging OR runnin* OR run OR rehabilitation OR train* OR retrain* OR return to sport)	2299
EMBASE	((anterior AND cruciate AND ligament AND reconstruction)OR 'anterior cruciate ligament reconstruction' OR (acl AND (graft OR replacement OR reconstruction))) AND (search AND 'light activities' OR 'light activity' OR joggin* OR jogging OR runnin* OR run OR rehabilitation OR train* OR retrain* OR 'return to sport')	3289
Web of Science	TOPIC: (((((anterior AND cruciate) AND ligament) AND reconstruction) OR (acl AND ((graft OR replacement) OR reconstruction))) AND (((((((light AND activities) OR (light AND activity)) OR joggin*) OR jogging) OR runnin*) OR run) OR rehabilitation) OR train*) OR retrain*) OR ((return AND to) AND sport)))	2398
PEDRO	Anterior cruciate ligament reconstruction + i) Rehabilitation ii) Run iii) Running iv) Jog v) Jogging vi) Light activity vii) Light activities viii) Return to sport ix) Training x) Retraining	111 2 5 0 0 0 0 5 119 4
SPORTDiscus	(((anterior AND cruciate) AND ligament) AND reconstruction) OR (acl AND ((graft OR replacement) OR reconstruction))) AND (((((((light AND activities) OR (light AND activity)) OR joggin*) OR joggins) OR runnin*) OR run) OR rehabilitation) OR train*) OR retrain*) OR ((return AND to) AND sport)))	4822
Cochrane Library	(((anterior AND cruciate) AND ligament) AND reconstruction) OR (acl AND ((graft OR replacement) OR reconstruction))) AND (((((((light AND activities) OR (light AND activity)) OR joggin*) OR joggins) OR runnin*) OR run) OR rehabilitation) OR train*) OR retrain*) OR ((return AND to) AND sport)))	1 Cochrane Reviews 4 Other Reviews 326 Trials 1 Methods Studies 2 Economic Evaluations

2.2 INTERET DES HOP TESTS COMME TESTS FONCTIONNELS DANS LA DECISION DE REPRISE DE LA COURSE A PIED APRES RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA.

Rambaud AJM, Rossi J, Neri T, Samozino P, Edouard P. Evolution of functional recovery using Hop Tests assessment after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective intensive sport practice cohort study. (en soumission)



Résumé et synthèse de l'article

Aux vues de la revue de littérature spécifique présentée précédemment, les tests fonctionnels des membres inférieurs les plus fréquemment utilisés après reconstruction chirurgicale du LCA sont les Hop Tests décrits par Noyes et *al.* (Noyes et *al.*, 1991) car ils ont l'avantage de reproduire des mouvements proches de ceux réalisés par les membres inférieurs lors de gestes sportifs (Xergia et *al.*, 2015). Ces tests permettent une évaluation globale des capacités fonctionnelles des membres inférieurs : stabilité globale du membre inférieur (Fitzgerald et *al.*, 2001; Myer et *al.*, 2011), force et puissance musculaire (Abrams et *al.*, 2014; Petschnig et *al.*, 1998; Shaw et *al.*, 2004), confiance pour le patient en son genou (Barber et *al.*, 1992; Hsu et *al.*, 2016; Noyes et *al.*, 1991) et capacité à tolérer des contraintes induites aux membres inférieurs, similaires aux activités sportives (Logerstedt et *al.*, 2012; Reid et *al.*, 2007). Lorsque ces sauts horizontaux sont réalisés, leur réception induit des forces de réaction du sol pouvant aller jusqu'à 12 fois le poids du corps en fonction de la distance performée (Perttunen et *al.*, 2000). La réception implique donc une grande capacité de force musculaire des muscles extenseurs de genou, de hanche, et des fléchisseurs plantaires de cheville afin de stabiliser et amortir la réception (McNitt-Gray, 1993). Tous ces muscles doivent alors se coordonner pour contrôler la triple flexion du membre inférieur permettant de ralentir le corps à la suite de ces sauts horizontaux.

Les Hop Tests décrits par Noyes et *al.* (Noyes et *al.*, 1991) sont aux nombres de 4 : le test unipodal de saut simple (SHT), le test unipodal de triples sauts (THT), le test unipodal de triples sauts croisés (COHT) et le test unipodal de temps parcouru sur 6 m (6-m TH). Même si Reid et *al.* (Reid et *al.*, 2007) ont rapporté une bonne reproductibilité du 6-m TH et des autres tests, il est celui qui possède le plus petit coefficient de corrélation intra-classe (ICC) (0,82%) et l'erreur standard de mesure la plus grande (5,6%). Nous avons préféré de ne pas l'utiliser dans nos travaux. Le COHT est le test avec la plus grande sensibilité (88%) pour identifier si le patient présente une fonction normale du genou (Abrams et *al.*, 2014). Il est également le test demandant le plus de capacité fonctionnelle (coordination de la force développée dans les 3 plans anatomiques) (Abrams et *al.*, 2014). Cependant, il provoque des pivots, induisant des contraintes importantes à la greffe du LCA, qui ne sont pas recommandées dans cette phase de rééducation. Ainsi, le COHT ne semble pas être adapté pour suivre l'évolution des capacités fonctionnelles durant la rééducation.

Nous avons donc choisi d'utiliser deux tests, le SHT et le THT, permettant d'étudier deux modes différents de sauts horizontaux et d'augmenter la sensibilité d'évaluation des Hop Tests (Barber *et al.*, 1992; Hopper *et al.*, 2002; Reid *et al.*, 2007). Reid *et al.* ont également montré que pendant le suivi de la rééducation de patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du LCA (entre la 16^{ème} et 22^{ème} semaine), ces deux tests présentent une bonne reproductibilité de mesure (SHT : ICC = 0,92 ; THT : ICC = 0,88%) (Reid *et al.*, 2007).

Il est à noter que le THT permet par rapport au SHT de tester la capacité de pliométrie du membre inférieur. Ainsi le SHT et le THT semblent les plus appropriés pour suivre les patients après reconstruction chirurgicale du LCA, afin d'avoir des évaluations objectives et en minimisant le risque lésionnel (Figure 2.2-1.).

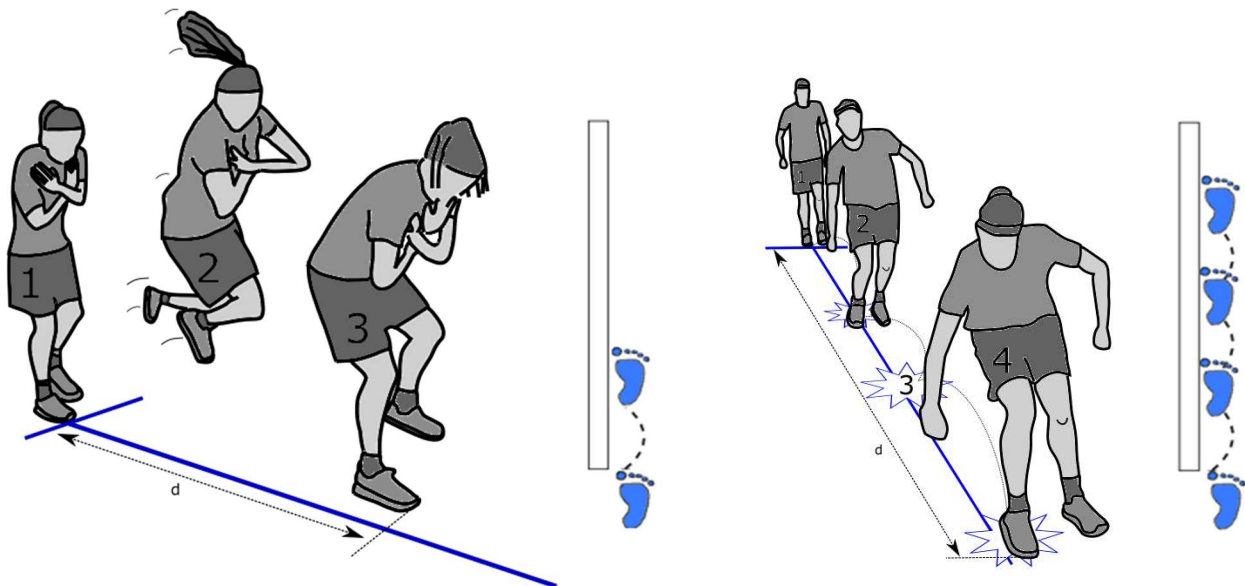


Figure 2.2-1. Simple saut (Single Hop Test for Distance ou SHT) et le Triple saut (Triple Hop Test for Distance ou THT).

La performance mesurée par les Hop Tests est la distance du(des) saut(s) réalisé(s). Le résultat de ces tests est généralement rapporté en utilisant le ratio de symétrie du membre, c'est-à-dire le rapport d'un côté par rapport à l'autre : opéré par rapport au sain dans le cadre de la reconstruction chirurgicale du LCA. Ce rapport est nommé "LSI" pour "Limb Symmetry Index" (1) (Shaw *et al.*, 2004).

$$LSI = \frac{Score_{opéré}}{Score_{sain}} \times 100 \quad (1)$$

Un LSI supérieur à 85%, pour ces Hop Tests (SHT et THT), est considéré comme normal (Barber *et al.*, 1992; Munro and Herrington, 2011). Ainsi, après reconstruction chirurgicale du LCA, il est recommandé d'atteindre un $LSI \geq 85\%$ pour pouvoir reprendre les activités de course à pied (Wilk *et al.*, 1999), et un $LSI \geq 90\%$ pour pouvoir reprendre les activités avec pivots/contacts et changements de direction (Abrams *et al.*, 2014; Barber-Westin and Noyes, 2011a; Thomeé and Werner, 2011), même si un LSI égal à 100% pourrait être optimal pour les sports de pivots/contacts (van Melick *et al.*, 2016).

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude a donc été d'analyser la récupération fonctionnelle du membre inférieur de patients après reconstruction chirurgicale du LCA, en utilisant des Hop Tests (SHT et THT) aux dates habituellement utilisées pour le continuum du retour au sport, soit 12-16 semaines pour la reprise de la course à pied, et 26-39 semaines pour le retour au sport pivot/contact (RTS). L'objectif secondaire était de comparer les délais où les patients atteignaient les critères des Hop Tests pour la reprise de la course à pied ($LSI \geq 85\%$) et pour le RTS ($LSI \geq 90-100\%$) avec les délais habituels utilisés pour la reprise de la course à pied (12-16 semaines) et pour le RTS (26-39 semaines).

Les patients volontaires pour cette étude étaient issus d'une cohorte de patients consécutifs d'un cabinet de kinésithérapie. Les patients étaient inclus s'ils avaient été opérés pour la première fois d'une reconstruction du LCA, si leur niveau d'activité avant la rupture était supérieur ou égal à 7 sur l'échelle de TEGNER (sportif pratiquant un sport pivot/contact en compétition (Figure 2.2-2)) et si la quantité de sport était supérieure à 8 sur l'échelle de MARX (sportif pratiquant plus d'une fois par semaine un sport de pivot/contact (Figure 2.2-2)). Les critères d'exclusions étaient la présence d'une blessure à une autre articulation du membre inférieur, d'une blessure à l'autre genou, la persistance de douleur, d'épanchement articulaire ou d'instabilité du genou opéré.

SCORE DE MARX

	Moins d'une fois par mois	Une fois par mois	Une fois pas semaine	2 ou 3 fois par semaine	Plus de 3 fois par semaine
Course : au cours d'un sport ou jogging	0	1	2	3	4
Changement de direction au cours de la course	0	1	2	3	4
Décélération : arrêt rapide pendant la course	0	1	2	3	4
Pivot : changement de direct, pied fixe au sol (ski, tennis, squash, foot, handball....)	0	1	2	3	4

SCORE DE TEGNER

10	Sport en compétition niveau Elite national : football, rugby
9	Sport en compétition : football, rugby (niveau inferieur), basketball, lutte, gymnastique
8	Sport en compétition : Squash, badminton, athlétisme, ski alpin
7	Sport en compétition : tennis, course à pied, handball, Sport loisir : football, rugby, basket, squash, badminton...
6	Sport loisir : tennis, badminton, handball, ski alpin, course à pied (au moins 5 fois par semaine)
5	Travail lourd (construction) Sport en compétition : Cyclisme, ski de randonnée Sport loisir : 2 fois par semaine ou moins
4	Travail modéré
3	Travail léger
2	Travail léger Et marche possible (hors randonnée avec sac à dos)
1	Travail sédentaire
0	Invalité liée à un problème de genou

Figure 2.2-2. Score de Marx (Marx et al., 2001) et Score de Tegner (Tegner and Lysholm, 1985)

Les Hop Tests étaient réalisés après 12 semaines opératoires ou lors de la première consultation si cette dernière était après. Puis ils étaient répétés tous les mois jusqu'au 6^{ème} mois postopératoire, puis tous les 3 mois jusqu'au 12^{ème} mois postopératoire.

Un examen clinique précédait leur réalisation et s'assurait que la douleur mesurée était inférieure à 2/10 sur une échelle visuelle analogique, que la flexion mesurée correspondait à 95% de la flexion de genou controlatéral, que l'extension de genou était complète, et qu'il n'y avait pas d'épanchement articulaire. Les Hop Tests étaient réalisés par le même expérimentateur et avec le même protocole. Avant leur passation, un échauffement de 5 minutes sur cycloergomètre était réalisé, puis il était suivi par 3 séries de 10 secondes d'étirements des muscles ischio-jambiers, quadriceps, et triceps sural. L'examineur montrait chaque test. Pour terminer l'échauffement et le familiariser à ces tests, le patient avait 3 essais, avec à chaque fois 30 secondes de récupérations. Les tests fonctionnels suivaient cet ordre: SHT du membre sain, SHT du membre opéré, THT du membre sain, THT du membre opéré. Pour chaque test et

chaque membre inférieur, 3 mesures étaient réalisées et la valeur maximale de chaque membre inférieur était retenue pour chaque modalité.

En résultat de cette étude, nous avons observé que les médianes du LSI du SHT et du THT ont augmenté avec le temps jusqu'à 9 mois postopératoires (ou 39 semaines) puis se sont stabilisées. La variabilité du LSI de SHT était importante à 12 et 16 semaines (IQR = 20%), alors qu'elle était plus faible de 22 à 52 semaines (IQR = 8 à 6%). À 12 semaines, la médiane du SHT était de 84% et ne répondait pas aux critères de $LSI \geq 85\%$ pour retourner aux activités de course à pied pour plus de la moitié des patients. Par contre, il est à noter qu'à 26 semaines, 75% de notre population avait des $LSI \geq 90\%$, correspondant à l'un des critères pour le retour au sport.

Les limites de l'étude étaient tout d'abord la comparaison des LSI aux critères. En effet, la définition de $LSI \geq 85\%$ reste arbitraire, et dépendant également du type de hop test. De plus, il est à noter que les SHT présentent de nombreuses façons de réalisations (mains croisées derrière le dos, mains croisées sur les épaules, mains libres), et qu'elles peuvent influencer sur la performance des tests et donc nuancer les résultats des LSI. L'expression de la symétrie par le ratio LSI est également une limite, car son calcul ne permet pas d'inclure la performance du test. Une limite également de cette étude était l'ordre de passation qui pourrait avoir un effet sur la confiance et la réalisation du test. Enfin, notre étude comportait également certaines limites par le faible nombre de patients inclus et la présence de données manquantes. Nous avons donc fait le choix d'analyser la médiane et l'espace interquartile afin de minimiser ces limites.

En conclusion, l'utilisation seule des critères de temps postopératoire ne semblait pas être adaptée pour décider de la reprise de la course à pied, car la grande variabilité des LSI du SHT retrouvée dans notre étude montrait des capacités fonctionnelles très différentes selon les individus après une reconstruction chirurgicale du LCA. Ainsi, il semble important d'individualiser la reprise de la course à pied. L'utilisation des Hop Tests, tests simples, rapides et fiables, permettrait d'adapter la décision de retour à la course à pied grâce à une évaluation objective et individualisée.

Article en version originale anglaise

Evolution of functional recovery using Hop Tests assessment after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective intensive sport practice cohort study.

Alexandre JM. Rambaud,¹⁻² Jérémy Rossi,¹ Thomas Neri,¹⁻³ Pierre Samozino,⁴ Pascal Edouard¹⁻⁵

¹ Univ Lyon, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, UJM Saint Etienne, Saint Etienne, France

² Physiotherapy Clinic of the Sport Center, La Talaudière, France

³ Department of Orthopaedic and Trauma Surgery, University Hospital Center of Saint-Etienne, Hôpital Nord, Saint-Etienne, France

⁴ University Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, F-73000 Chambéry, France

⁵ Department of Clinical and Exercise Physiology, Sports Medicine Unit, University Hospital of Saint-Etienne, Faculty of Medicine, Saint-Etienne. France

Authors email address :

AR – alexandre.rambaud.kine@gmail.com

JR – jeremy.rossi@univ-st-etienne.fr

TH – thomasneri@orange.fr

PS – pierre.samozino@univ-smb.fr

PE - pascal.edouard42@gmail.com

Address correspondence to Alexandre JM RAMBAUD, LIBM, Université de Lyon, Campus Santé Innovations IRMIS, 10 rue de la Marandière, 42270 Saint-Priest en Jarez, France. E-mail: alexandre.rambaud.kine@gmail.com

ABSTRACT

Objectives: To analyse changes in functional performance recovery objectively evaluated by Limb Symmetry Index (LSI) of the Single (SHT) and Triple Hop Tests (THT) between 12 and 52 postoperative weeks after anterior cruciate ligament reconstruction in an intensive sport practice population, and to compare their values with usual time-based and performance-based criteria used in clinical decision-making for return to running-activities and for return to sport.

Methods: Thirty-one patients performed SHT and THT at 12, 16, 22, 26, 39 and 52 ACLR postoperative weeks. At each session, the median and interquartile range (IQR) of SHT and THT LSI were calculated and compared with the usual criteria.

Results and conclusion: The median of SHT and of THT increased over time to 9 postoperative months and stabilized thereafter. SHT LSI variability was important at 12 and 16 weeks (IQR=20%), while lower from 22 to 52 weeks (IQR=8 to 6%). At 12 weeks, the median of SHT was 83.6% and did not meet LSI>85% criteria to return to running-activities. At 26 weeks, 75% of our population had LSIs > 90%, corresponding to one of the criteria for return to sport.

Key Words: knee, One-leg hop tests, Outcome measures, functional testing, return to sport.

Highlights

- The median of single and triple hop tests increased with postoperative time to 9 months and stabilized thereafter.
- The inter-individual variability was greater with the Single One-Leg Hop Test than the Triple One-Leg Hop Test regarding the timeframe for a return to running-activities (12 -16 postoperative weeks).
- Authorization to return to sporting activities must be individualized, at each step of the RTS continuum.

INTRODUCTION

Anterior cruciate ligament (ACL) injuries are common in young and active population with an incidence of 0.7 to 2.5 ACL injuries per 1000 sport-exposures^{1,2}. After an ACL injury, for patients with chronic functional knee instability and/or who desire a return to cutting and pivoting sports, surgical ACL reconstruction (ACLR) has become the standard treatment (Webb et al. 1998; Ardern et al. 2010). This is followed by a rehabilitation program to aid functional recovery, which could be defined as recover the knee functions (strength, balance, proprioception). This functional recovery is an essential aim in the postoperative management³, and is one of the keys to success in the return to sport continuum (RTS-continuum)⁴.

The timing for this RTS-continuum is a challenging decision, described by Ardern et al.⁴ in three parts: return to participation, return to sport (RTS) and return to performance. After ACLR, the timeframe commonly used for the return to participation, including light and running activities (RTR), is a period of 3-4 months (12-16 weeks) postoperatively⁵⁻⁷, i.e. during the rehabilitation phase. RTS in contact and side cutting sports is frequently reported as occurring between 6-9 postoperative months (26-39 weeks)⁸⁻¹⁰.

Too often, this challenging decision is taken based only on time-based criteria¹¹. However, if the RTS is allowed without assessment based on objective and functional criteria, it exposes patients to a high risk of reinjury^{8,10}. So, it seems important to use objective criteria for an optimal and individualized RTS. In addition to respecting the time necessary for the graft to heal, an objective test battery should at least include clinical assessments¹². In order to have a global, objective view of the analytic and functional recovery, functional evaluation also seems to be important.

The most commonly reported lower limb functional tests used after ACLR are the One-leg hop tests¹³ and a combination of One-leg hop tests found more sensitive for detecting abnormal symmetry of the lower limbs¹⁴. The most commonly used tests to evaluate patients with ACLR are: the Single One-Leg Hop Test (SHT), the Triple One-Leg Hop Test (THT) and the Cross-Over Hop Test (CO)¹⁵. CO inducing rotational joint constraints¹⁶, it should not be used before 6 months postoperatively. Thus, SHT and THT, seem appropriate and not dangerous to follow the evolution of a cohort by performance-tests¹⁷. One-leg hop tests give objective values, provide an indication of the level of functional recovery of the lower limb after an ACLR, and can be used as objective criteria for the decision to RTS-continuum^{8-10,18}. Performing One-leg hop tests requires strength, power, neuromuscular control^{13,19,20}, and provide psychological reassurance to the patient^{21,22,19,23}. Result of these tests is usually reported using the limb symmetry index (LSI): the distance for the injured limb divided by the distance for the uninvolved limb x 100²⁰. For the One-leg Hop Tests, LSI > 85% is considered as normal^{22,24}. After ACLR, LSI ≥ 85% is recommended for a return to running activities (RTR)²⁵. And LSI > 90% is recommended for RTS^{13,26,27}, even if 100% may be optimal for pivoting/contact sports¹².

In a systematic review and meta-analysis, Abrams et al¹³, reported that the LSI means of SHT and THT at 6, 9, 12, 18 and 24 months after ACLR improved with time and all results were greater than 90% only after 9 months postoperatively. However, they did not provide any information regarding the RTR phase. Hopper et al.²⁸ studied the evolution of 4 tests performed 5 times between 12 and 52 weeks in a cohort of 19 patients. They used the 6m timed Hop Test, the Crossover Hop Test, while most One-leg hop tests used are the SHT and THT¹³. Hartigan et al (2010), who tested the impact of two different rehabilitation protocols after ACLR on lower limb functional recovery²⁹, reported very important ranges of LSIs values at 12 weeks for the two groups (LSI of SHT: 57-107% and LSI of THT: 63.6-99.5%).

In comparison to the RTS phase, very few information is available on hop tests LSIs values during the RTR phase⁷ in³⁰. Indeed, RTR is most often guided by the rehabilitation protocol. Moreover, there exists no definition of objective criteria to guide RTR⁷, while this is an important step in the RTS-continuum after ACLR.

As suggested by the latest recommendations for RTS^{8,10,12}, One-leg hop tests are one of important assessments for the test battery (clinical and strength evaluation, questionnaires assessing kinesophobia, self-report knee scoring), but the criteria for One-leg hop tests for RTS are not clearly defined (LSI=90%, 95% or 100%^{26,31}). Van Melick et al¹² also described this lack of scientific evidence in their clinical practice guidelines, underpinned by a systematic review and expert consensus.

The management of ACLR rehabilitation and the different milestones of the RTS-continuum is thus challenging. Optimal time periods are difficult to determine objectively and often debated^{5,11,13,26,32}. Many clinicians still use only a time-based criterion for the RTS-continuum¹¹, while the use of One-leg hop tests could be a useful, easy, quick way to aid decision-making regarding RTR and/or RTS as they provide an objective assessment of functional recovery after ACLR. In this context, the principal purpose of this study was therefore, to analyse the functional recovery of patient's lower limb after ACLR, using One-leg hop tests (SHT and THT) at the usual intervals on the RTS-continuum (12-16 weeks for RTR, and 26-39 weeks for RTS). The secondary objective was to compare the times when patients reach the One-leg hop tests criteria for RTR (LSI \geq 85%) and RTS (LSI \geq 90-100%) with the usual timelines used for RTR (12-16 weeks) and RTS (26-39 weeks).

METHODS

Study Design

We conducted a prospective cohort study during which patients who had a ACLR were repeatedly assessed using functional hop tests after the early rehabilitation phase (when patients were allowed to

start to run: 12 weeks postoperatively) until the end of the complete return to sport continuum (52 weeks postoperatively). The present study protocol was reviewed and approved by the local University Hospital Ethics Committee.

Population

Patients volunteered to participate in this study and came from a cohort of consecutive patients at a local physiotherapy clinic undergoing rehabilitation after ACLR. Patients were included if 1) they had undergone an ACLR using an autograft (patellar or hamstring tendon), 2) their activity level before ACL injury was greater than 7 on the TEGNER Activity level scale³³ and was greater than 8 on the Marx Activity Rating Scale³⁴, and 3) they were following the same standardized rehabilitation protocol as previously described (ACL Reconstruction Rehabilitation Protocol was described in a supplementary appendix of Rambaud et al.³⁵). Exclusion criteria were: 1) orthopedic or musculoskeletal conditions affecting the lower limbs, especially the hip or ankle, 2) an existing or previous injury to the ipsilateral knee, 3) persistent abnormal pain, and swelling or instability of the knee after ACLR. Patients with meniscus repairs were not excluded, but patients with associated lesions (osteochondral lesions, multiple ligament injuries) other than meniscal were excluded. Medical, demographic and sports data (age, weight, height, Tegner and Marx Scale Activity before ACL injury).

One-leg hop tests

The first One-leg hop tests were performed 12-weeks postoperatively if the patient's clinical assessment allowed this: pain <2/10 on the visual analogue scale, 95% knee flexion range of motion (ROM) compared to uninvolved limb, full knee extension ROM, and no effusion (Grade zero at Modified stroke test³⁶)⁷, or at the first consultation using the same clinical criteria if the patient first presented later than 12 weeks.

One-leg hop tests (SHT and THT) were conducted using the same protocol^{21,35} and all tests were done by the same experimenter (AR). High reliability has been reported for these two hop tests in patients with ACLR (For SHT: Intraclass Correlation Coefficients (ICC) from 0.92 to 0.97, Standard error of measurement (SEM) = $\pm 3.49\%$; for THT: ICC of 0.88; SEM = $\pm 4.32\%$) (Clark, 2001; Reid, Birmingham, Stratford, Alcock, & Giffin, 2007).

Prior to functional testing, a warm-up was performed on a stationary bicycle ergometer for 5 minutes, followed by 3 bouts of 10-second static stretches for hamstrings, quadriceps, gastrocnemius, and soleus muscle groups. The physiotherapist (AR) then demonstrated each functional test. For familiarization

and finalizing the warm-up, patients practiced each test 3 times with a 30-second rest between each test, in the following order: SHT and THT. Maximal One-leg hop tests were then performed starting with the SHT and then the THT. Patients performed one hop (SHT), standing on the healthy limb, with the arms crossed, hands on shoulders, as far as possible, with a controlled, balance landing (held for a minimum 3 seconds). If the patient could not maintain the landing position, made extra hops, or did not keep his hands on his shoulders, then the hop test was considered a failure. This was then repeated for the operated limb. The patient then performed the THT, starting with the healthy limb, with 3 consecutive hops as far as possible. The last hop position also had to be maintained for a minimum of 3 seconds. Every attempt included at least 3 jumps and was continued until the patient progressed. The distance was measured from the start line to the toe of the foot. The best test scores (in cm) for each limb and each test were used for analysis ³⁵.

As previously described, the limb symmetry index (LSI) was used to measure the functional recovery of the knee and was calculated as follows: the distance for the operated limb divided by the distance for the healthy limb x 100 ²⁰. LSI were calculated for SHT (LSI(SHT)) and THT (LSI(THT)). Since at least 2 functional tests are recommended when deciding a return to sport ²⁶, we also calculated the average of both LSI from the SHT (LSI(SHT)) and THT tests (LSI(THT)) called LSI(STHTavg), in order to allow statistical analysis of the overall recovery after the early rehabilitation phase with a global functional performance score: $LSI(STHTavg) = (LSI(SHT) + LSI(THT)) / 2$.

Data Analysis

In order to analyse the recovery of lower limb function and performance after ACLR, the quantitative variables of One-leg hop tests (SHT and THT) were evaluated with the median and the interquartile range (IQR) for LSI(SHT), LSI(THT) and LSI(STHTavg) at 12, 16, 22, 26, 39 and 52 weeks postoperatively, because the data were not normally distributed (assessed by Shapiro-Wilk test). Moreover, as the functional recovery was non-linear ²⁸, the changes in LSI rehabilitation times were described with a nonlinear analytical method, the LOESS method: LOcally wEighted Scatter-plot Smoother method ³⁷ (span=0.75, 2 degrees of polynomials). The LOESS fitted curve is a form of nonparametric regression that summarizes the relationship between two variables without requiring any specification of the relationship between variables. The advantage of this procedure is to smooth the data set, weighting down the outliers in the scatterplot.

In regard to our secondary objective, these LOESS fitted curves, describing trends and the relation between the postoperative time and the LSIs scores, were compared with the four common LSI criteria flagged on the RTS-continuum: **85% for RTR** (LSI < 85 % represents an abnormal knee ²¹ and LSI ≥ 85 % is a criterion to start **running activities** ²⁵), **90% and 95% for RTS without competition** (LSI ≥ 90%

is a criterion to return to sport ^{26,27,38}), and **100%** ($LSI \geq 100\%$ is a criterion to **return to performance**: pivot sports in competition ²⁶). The patient must meet criteria on 2 One-leg hop tests for RTR or RTS, so only the predictive values of LSI(STHTavg), the global functional performance score, were computed. Predictive values for each criterion (LSI= 85%, 90%, 95%, 100%) were calculated, giving a prediction of the time necessary to meet criteria for RTR and RTS).

Statistical analyses were conducted with R software (version 3.1.0 (2014-04-10) Copyright (c) 2014 The Foundation for statistical Computing (Comprehensive R Archive Network, <http://cran.r-project.org/>).

RESULTS

Population

Thirty-one patients (12 women and 19 men; age: 23.0 ± 7.6 years; height: 174 ± 9 cm; weight: 70.1 ± 10.2 Kg; BMI (body mass index): 23.1 ± 2.5 kg.m²) were included in this study. The means of Tegner Scale Activity and the Marx Activity Rating Scale were respectively 8.5 ± 1.1 and 13.8 ± 2.3 .

A total of 90 data points was obtained for these 31 patients. At 12, 16, 22, 26, 39, 52 weeks postoperatively, n=12, n=12, n=10, n=25, n=17 and n=14 evaluations were obtained, respectively.

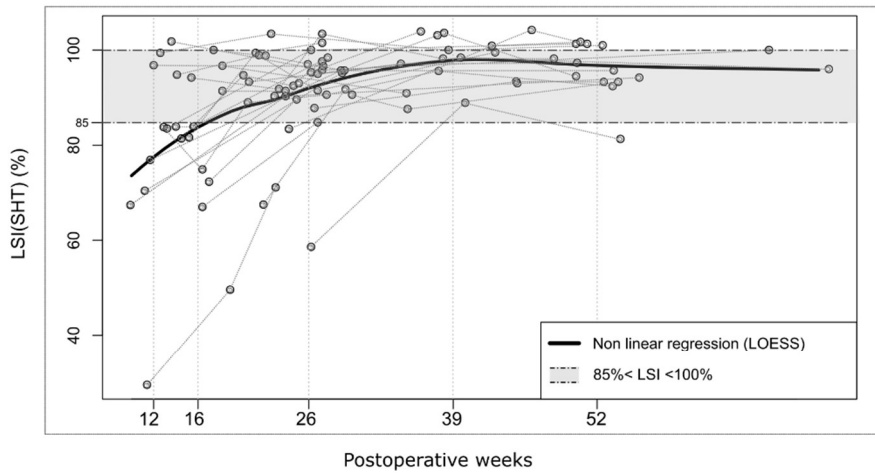
Evolution of LSI scores over time

The functional recovery of patients assessed by the LSI(SHT), LSI(THT) and LSI(STHTavg) are presented in Table 1 and with a nonlinear regression curve in Figure 1. The median of SHT and THT increased postoperatively to 39 weeks and stabilized after this time. There was important inter-individual variability of LSI(SHT) at 12 and 16 weeks: IQR= 20.0% and 20.1%, respectively. The IQR of LSI(SHT) decreased over time to 6.0% at 52 weeks (Table 1 and Figure 2), but the IQR of LSI(THT) varied less over time (range between 8.1% and 13.9%).

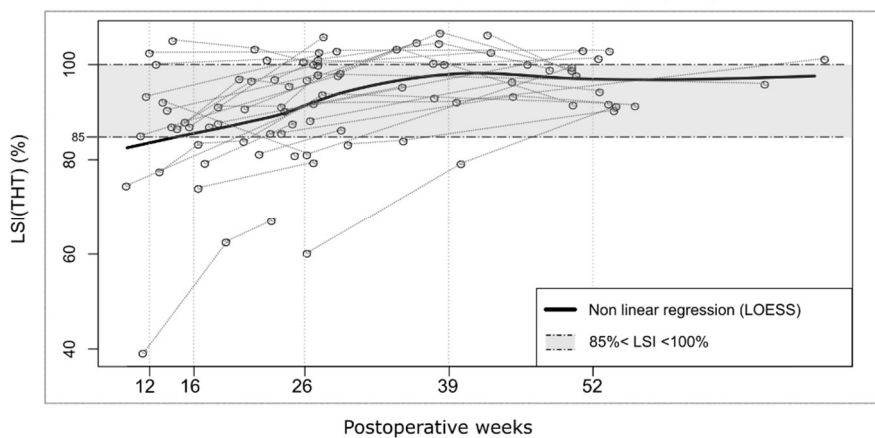
Table 1. Median and (IQR) of Limb Symmetry Index (LSI) of Single One-Leg Hop Test (SHT), Triple One-Leg Hop Test (THT) and average of SHT and THT (STHTavg) at 12, 16, 26, 39 and 52 postoperative ACLR weeks.

Postoperative week	Limb Symmetry Index (%)		
	SHT	THT	STHTavg
	Median(IQR) [Q1-Q3]	Median(IQR) [Q1-Q3]	Median(IQR) [Q1-Q3]
12 weeks (n=12)	83.6 (20.0) [75.3-95.3]	88.6 (11.9) [83.0-94.9]	85.2 (17.1) [79.8-96.9]
16 weeks (n=12)	87.6 (20.1) [74.2-94.3]	86.8 (8.1) [81.1-89.2]	88.3 (14.3) [78.2-92.4]
22 weeks (n=10)	91.6 (7.9) [89.3-97.2]	91.0 (12.8) [83.7-96.5]	92.6 (10.3) [86.7-97.0]
26 weeks (n=25)	95.2 (6.4) [93.9-97.8]	96.7 (13.9) [94.4-101.4]	95.8 (10.7) [94.1-100.0]
39 weeks (n=17)	98.4 (7.9) [93.4-101.3]	100.0 (10.0) [93.2-103.2]	100.1 (7.4) [94.2-101.6]
52 weeks (n=14)	95.9 (6.0) [93.6-99.5]	96.7 (9.1) [91.5-100.5]	97.2 (6.1) [93.0-99.1]

A. Evolution of the Limb Symmetry Index of the Single Hop for distance (LSI(SHT))



B. Evolution of the Limb Symmetry Index of the Triple Hop for distance (LSI(THT))



C. Evolution of the Limb Symmetry Index of the Single and Triple Hop for distance average (LSI(STHTavg))

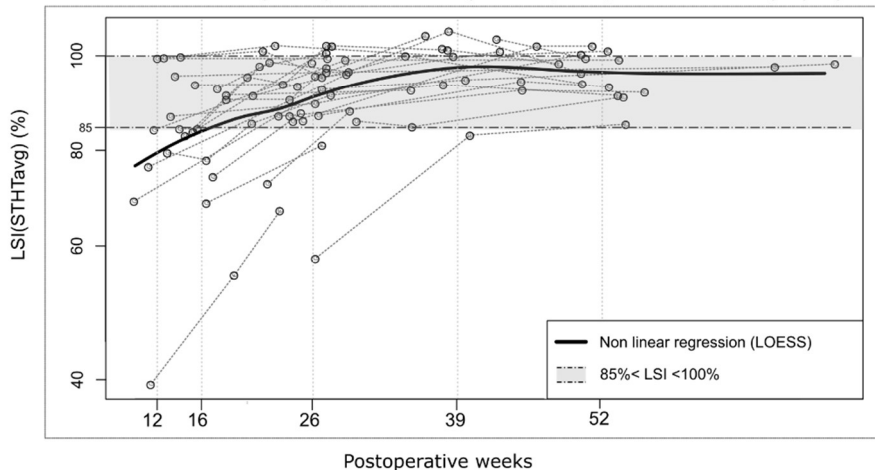


Figure 1. Evolution of the Limb Symmetry Index of (A) the Single One-Leg Hop Test (LSI(SHT)), (B) the Triple One-Leg Hop Test (LSI(THT)) and (C) the average of these 2 tests (LSI(STHTavg)) with postoperative time to Return To Running-activities (12, 16, 22 weeks) and to Return To Sport (26, 39, 52 weeks). The bold black line shows the non-linear regression, the gray zone LSI values between 85 and 100%. Each plot represents one test by one patient; all evaluations for a single patient are linked by a line.

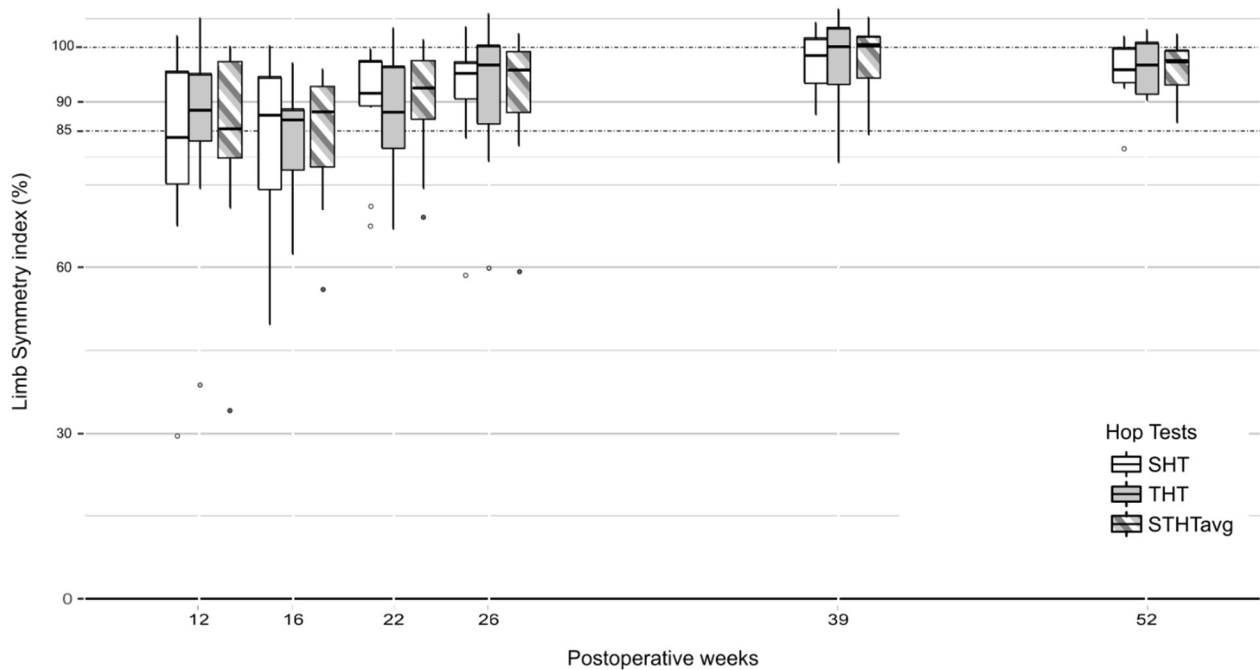


Figure 2. Box plot describing the variability of Limb Symmetry Index's Hop Tests with postoperative ACLR time (12, 16, 22, 26, 39 and 52 weeks); outliers are represented by points, white box plots represent LSI of SHT: Single One-Leg Hop Test, gray boxplots represent LSI of THT: Triple One-Leg Hop Test, and hatched boxplots represent LSI of STHTavg: average of SHT and THT.

Comparison of LSI scores with common LSI criteria

At 12 postoperative weeks, the median of LSI(SHT) was less than 85%, while LSI(THT) and LSI(STHTavg) were higher (LSI(THT): 88.6% (Q1-Q3: 83.0-94.9%) IQR=11.9; LSI(STHTavg): 85.2% (Q1-Q3: 79.8-96.9%) IQR=17.1, Table 1). All medians of the different LSI were greater than 85% at 16 weeks, and greater than 95% at 26 weeks.

Predictive values of time to reach 4 common criteria

The LOESS fitted curve of STHTavg had reached the LSI thresholds of 85% at 16.1 ACLR postoperative weeks, 90% at 23.8 weeks and 95% at 30.9 weeks (figure 1). The LOESS curve never reached LSI=100%.

DISCUSSION

To our knowledge, the present study is the first to investigate the evolution of functional recovery after ACLR using SHT and THT between the 3rd and the 12th postoperative months. The main findings of the

present study in an intensive sport practice population were that 1) the median of single and triple hop tests increased with time to 9 months and stabilized thereafter, 2) the inter-individual variability of the Single One-Leg Hop Test was large for time to return to running-activities (12-16 postoperative weeks) while less for return to sport activities, 3) at 12 weeks, the median of SHT was 83.6% and did not meet the $LSI \geq 85\%$ criterion for a return to running-activities. At 26 weeks, the first quartile of SHT and THT were $\geq 90\%$, acceptable for RTS. The predictive values of the average of LSI SHT and THT scores confirmed these results.

The present study reports that functional recovery, assessed by the One-leg Hop Tests (single and triple hop tests), was similar to a general growth model described by Cupido et al.^{28,39} with a plateau phase around 39 postoperative weeks. Abrams et al.¹³ reported in a meta-analysis LSI values for the RTS phase (6, 9 and 12 months, respectively 26, 39 and 52 weeks), but there was no information regarding values before 26 postoperative weeks, corresponding to the RTR phase. In addition, only one study focused on the functional recovery after ACLR by Hop Tests analysing the evolution of 4 tests between 12 and 52 postoperative weeks in a cohort of 19 patients²⁸. However, they used different functional tests not including SHT and THT and did not meet the RTR phase⁷. Hartigan et al.²⁹ measured the evolution of the LSI at 12, 26 and 52 weeks to compare two types of training: “Perturbation” or “Strength” training. In order to make appropriate statistical analysis, they used only statistical tests comparing mean to analyse LSI of different Hop Tests of two different trainings. It is particularly noticeable that their Hop Tests data were not normally distributed and at 52 weeks postoperatively, ranges of SHT and THT LSIs were very large (between 57.3 and 77.0% for the lowest values and between 91.3% and 107% for the highest values).

At 12 weeks, the LSI mean of SHT for the two groups were 83.7% and 83.1%, comparable with the present results (median of 83.6%). For the LSI of THT, our results (median of LIS of THT =88.6%) are slightly higher (82.4% and 86.4% for two Hartigan’s groups). The comparison between median and mean in data not normally distributed could explain these differences. Indeed, the range of two groups of Hartigan et al. are 63.6% and 77.0% for the lowest values and 99.5% and 91.3% for the highest values compared to the range observed between 83.0 and 94.8%. This large dispersion of LSI values at 12 weeks postoperatively supports the use of the median than the mean to describe the evolution of the LSI of functional test of patient with ACLR.

For LSI of SHT, Abrams et al.¹³ reported an average of $87 \pm 6\%$, $90 \pm 2\%$ and $92 \pm 3\%$ at 26, 39 and 52 weeks respectively, compared to $95.2 \pm 6\%$, $98.4 \pm 8\%$ and $95.9 \pm 6\%$ in our study. This gap (about 3.9 to 8.2%) could be explained by the fact that our analysis used medians, while the meta-analysis used means. This could also be explained by the differences in hop test methodology (e.g. hand/upper extremity position, maximal hop distance or average hop distance⁴⁰), and the differences in population

between the two studies: a lack of population homogeneity in the studies included in their meta-analysis, and the homogeneity and high-level of sport practice in competitive pivot/contact sports in our cohort. The between-study differences of LSI(THT) were however low (between 2 and 3%). In agreement with Abrams et al.'s results ¹³, our study reported a LSI(THT) higher than LSI(SHT) over the RTS phase. During the functional recovery phase, performing the SHT seemed to be more difficult for patients than performing the THT. Indeed, according to Hamilton et al. ⁴¹ for healthy subjects and our personal data on ACLR patients, the THT is strongly correlated with the strength of the quadriceps and hamstrings measured by isokinetic at 60 °/s ($r = 0.62 - 0.77$), whereas for the SHT, the correlations found are lower ($r = 0.54$ for preoperative patients, $r = 0.49$ for ACL deficient patients, $r=0.49$ for ACLR patients at 26 weeks postoperatively ^{21,42}). The THT requires altering landing and jump, more soliciting muscle controlling the knee flexion and extension.

At the first step of the RTS-continuum (i.e. the return to running-activities phase between 12 and 16 weeks), there was great variability in LSI (SHT): the IQRs were around 20.0%. At 22 weeks, the IQRs had dropped to 6.0%. In contrast, with LSI (THT), the IQRs varied only slightly, between 8.1 and 13.9%, regardless of time while the LSI (STHTavg) gradually decreased with postoperative time (from 17.1% to 6.1%). The greater variability of LSI (SHT) during the RTR phase could be due to the heterogeneity of the healing process: some patients simply recover earlier than others. This great variability agrees with the results of other studies on strength and functional recovery after early rehabilitation ⁴³⁻⁴⁵. Moreover, differences between LSI (SHT) and LSI (THT) for the median and IQR could indicate, for patients with slow recovery, that SHT was more difficult to perform than THT. The SHT could therefore be a more adapted criterion for the decision to RTR. However, there is a consensus that at least two tests should be used for greater sensitivity in functional follow-up ^{14,22,46,47}. Our results showed that these two tests did not provide the same results regarding functional recovery although the THT does appear to complement the SHT; we feel that a combination of these two tests could aid better evaluation of individual recovery in the RTR phase.

Many post-ACLR rehabilitation protocols propose starting running activities at 12 postoperative weeks, but more and more studies now suggest 16 postoperative weeks for RTR ⁷. In our present study, between these two dates, the median of LSI (STHTavg) was higher than the criterion to RTR ($LSI \geq 85\%$). Yet, if we analyze LSI(SHT) and LSI(THT) separately, we observe that the median of LSI(SHT) was less than 85% at 12 weeks. Thus, according to the latest recommendations to use an association of different Hop Tests criteria for RTS ¹⁰, $LSI \geq 85\%$ criteria should be met in both tests to allow RTR, which was not the case with half our patient cohort. Therefore, the date of 16 weeks seems to be more conducive to start running activities in our population. More than half our population had a score above 85% in both tests

at 16 weeks, and almost a 1/4 had a score greater than 90% (Q3 of LSI(SHT) = 94.3% and Q3 of LSI(THT) = 89.2%), showing early functional recovery. These results are also found with the median of LSI(STHTavg), which reached 88.3%, a score well above the goal of 85%. In addition, the predictive time value of LSI(STHTavg)=85% was 16.1 weeks. Thus, if the RTR decision is based solely on time, many patients at 12 weeks (3 months) would start to run without a functionally normal knee (LSI > 85%). In our cohort, even if we postponed this by one month (16 weeks / 4 months), just under half our patients would not have met these functional criteria and optimal recovery for RTR corresponding to the first stage of the RTS continuum. It seems important to use these functional tests rather than just postoperative time to take the decision to RTR, which could otherwise jeopardize his ACL rehabilitation and his RTS⁴. In addition, these results highlight the interest of individualizing the management of RTR decisions after ACLR given inter-patient variability.

At the second step of RTS-continuum (i.e. the return to sport phase at 26 weeks or 6 postoperative months), 75% of our population had LSIs of SHT and THT higher than 90% (Q1 of SHT and THT were respectively 93.4 and 93.2%). The trend of the nonlinear regression curves between the 6th and 9th months continued to increase and stabilized towards the 9th month. This date seems to be key. Indeed, Grindem et al.⁸ indicated that postponing RTS from 6 months to 9 months would reduce the risk of new knee injuries. In their study, they reported that for each 30-day postponement after the 6th month, subsequent knee injuries decreased by 50%. Our present results confirm that functional recovery appears to continue beyond 6 months. This seems consistent with the study from Gokeler et al.⁹ reporting a lack of recovery at 6 months after ACLR, and proposing additional rehabilitation to meet RTS criteria. The functional recovery process seems to take longer than 6 months, and appears to continue until one year after surgery⁴⁸.

Finally, in our present study, we also reported that the predictive time to reach 90% was 23.8 postoperative weeks (i.e. before the 6th month) for LSI(STHTavg). So, a patient who has undergone rehabilitation without complications should have achieved LSI ≥ 90% at 6 months. If this is not the case, it is important to look for the causes and adapt the date of RTS. The 90% criterion seems to be achievable quickly, well before the classic date of 6-months for a RTS, but the 95% criterion expected in the 6th – 9th month phase would seem to be more difficult to attain. The predicted time for LSI(STHTavg)= 95% was the 31st postoperative week, i.e. between the 6th and 9th postoperative months. However, it was impossible for us to calculate the predictive time of LSI(STHTavg)=100% because this value was not always reached by the nonlinear regression curve in our cohort even 1 year after surgery. So not all our cohort had returned to LSI symmetry after one year, despite a population of patients wishing to return to their sport as quickly as possible. Therefore, it seems necessary to better define the criteria for One-

leg hop tests to help and encourage clinicians to use them, in order to objectify functional recovery according to the type of population.

Limits and perspectives

Some limitations of the current study need to be addressed. There is a lot of One-leg hop test methodology (hand or upper extremity position, duration of balance required for a “successful” test, average hop distance or maximal hop distance) and they can influence LSIs. The THT was always performed secondly, after the SHT. It is possible that patients became more confident or comfortable performing THT after completing SHT. So, the study conclusions apply only to our methodology.

We acknowledge a small sample of patients who were not tested at precisely the same times after ACLR. However, the 90 data points used to construct the non-linear curve, and the choice of using medians and interquartiles allowed us to avoid some biases in the statistical analyses. In addition, the homogeneity of the population with regards rehabilitation and pre-injury sport level avoids bias in interpreting functional recovery variability. We did not analyse the potential differences between women and men because we calculated symmetry scores and not a performance score. The use of LSI allowed us to hide the sex-, age- and sport-related.

Clinical implications

Recent studies have recommended using a test battery including multiple functional, strength and timeline criteria when making the decision to authorize a RTR and RTS^{8-10,12}. In the light of our present findings, we suggest individualizing the authorization to return to sporting activities at each step of the RTS continuum. This is in line with the recommendations for individualized rehabilitation proposed by van Melick et al.¹². These authors suggested using a traffic-light method of progression, including functional goal-based criteria, to pass from one rehabilitation phase to the next. In practice, as suggested Hartigan et al. to perform Hop Testing²⁹ we also suggest that patients with ACLR could start RTR between 12 and 16 weeks postoperatively, if they present a clean clinical exam (full ROM or 95% of the non-injured knee, no effusion, no pain or pain <2 on the visual analogue scale), normal gait, a LSI of quadriceps strength greater than 80% and a LSI of SHT and THT greater than 85%.

The second step of the RTS continuum (i.e. the return to the field / pivot or side-cutting sports training e.g. soccer, rugby...) is an important milestone for the patient. From 6 months (26 weeks), clinicians could use SHT and THT as a pre-test, with LSI<90% as a red flag for RTS before a complete test battery including, for example: questionnaires, One-leg Hop tests with pivots (Cross-over Hop Test), isokinetic and field assessments¹⁰.

Conclusion

This study describes the evolution of functional recovery assessed by One-leg Hop Tests between the 3 and 12 months (12 and 52 weeks) postoperatively after ACLR. The great inter-individual variability of functional recovery between 12 and 16 weeks postoperatively suggests the importance of using One-leg hop tests when deciding on a return to running-activities. At six months (26 weeks), 75% of our population had LSIs of SHT and THT higher than 90%, corresponding to one of the criteria for RTS. We recommend using One-leg Hop Tests to help the decision of return to running activities and in RTS test battery, in order to ensure normal functional recovery of patients and their readiness to RTS.

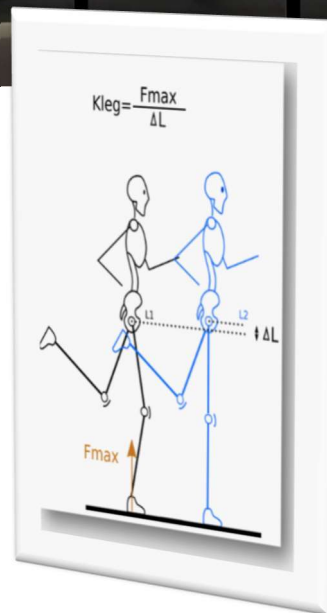
References

- 1 Collins JE, Katz JN, Donnell-Fink LA, *et al.* Cumulative Incidence of ACL Reconstruction After ACL Injury in Adults Role of Age, Sex, and Race. *Am J Sports Med* 2013;**41**:544–9.
- 2 Prodromos CC, Han Y, Rogowski J, *et al.* A meta-analysis of the incidence of anterior cruciate ligament tears as a function of gender, sport, and a knee injury-reduction regimen. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc* 2007;**23**:1320-1325.e6.
- 3 van Melick N, Hoozeboom T, Pronk Y, *et al.* Only 19% of pivoting athletes after anterior cruciate ligament reconstruction meets return-to-play (RTP) criteria when their physical therapist releases them to RTP. *Phys Ther Sport* 2017;**28**:e20–1.
- 4 Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, *et al.* 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med* 2016;**50**:853–64.
- 5 Cascio BM, Culp L, Cosgarea AJ. Return to play after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Sports Med* 2004;**23**:395–408.
- 6 Janssen RPA, du Mée AWF, van Valkenburg J, *et al.* Anterior cruciate ligament reconstruction with 4-strand hamstring autograft and accelerated rehabilitation: A 10-year prospective study on clinical results, knee osteoarthritis and its predictors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2013;**21**:1977–88.
- 7 Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P, *et al.* Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. *Br J Sports Med* 2018;:bjsports-2017-098602.
- 8 Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, *et al.* Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2016;**50**:804.
- 9 Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, *et al.* Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;**25**:192–9.
- 10 Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, *et al.* 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. *Br J Sports Med* 2016;**50**:946-U84.
- 11 Barber-Westin SD, Noyes FR. Objective Criteria for Return to Athletics After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Subsequent Reinjury Rates: A Systematic Review. *Phys Sportsmed* 2011;**39**:100–10.
- 12 van Melick N, van Cingel REH, Brooijmans F, *et al.* Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med* 2016;:bjsports-2015-095898.
- 13 Abrams GD, Harris JD, Gupta AK, *et al.* Functional Performance Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Orthop J Sports Med* 2014;**2**:2325967113518305.
- 14 Fitzgerald GK, Lephart SM, Hwang JH, *et al.* Hop tests as predictors of dynamic knee stability. *J Orthop Sports Phys Ther* 2001;**31**:588–97.
- 15 Almagoush A, Herrington L. Functional Performance Testing and Patient Reported Outcomes following ACL Reconstruction: A Systematic Scoping Review. *Int Sch Res Not* 2014;**2014**:1–14.

- 16 Besier TF, Lloyd DG, Cochrane JL, *et al.* External loading of the knee joint during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc* 2001;**33**:1168–75.
- 17 Logerstedt DS. Knee Stability and Movement Coordination Impairments: Knee Ligament Sprain. *J Orthop Sports Phys Ther* Published Online First: April 2010.
- 18 Augustsson J., Thomeé R., Karlsson J. Ability of a new hop test to determine functional deficits after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2004;**12**:350–6.
- 19 Clark NC. Functional performance testing following knee ligament injury. *Phys Ther Sport* 2001;**2**:91–105.
- 20 Shaw T, Chipchase LS, Williams MT. A users guide to outcome measurement following ACL reconstruction. *Phys Ther Sport* 2004;**5**:57–67.
- 21 Noyes FR, Barber SD, Mangine RE. Abnormal lower limb symmetry determined by function hop tests after anterior cruciate ligament rupture. *Am J Sports Med* 1991;**19**:513–8.
- 22 Barber SD, Noyes FR, Mangine R, *et al.* Rehabilitation after ACL reconstruction: Function testing. *Orthopedics* 1992;**15**:969–74.
- 23 Hsu C-J, George SZ, Chmielewski TL. Association of Quadriceps Strength and Psychosocial Factors With Single-Leg Hop Performance in Patients With Meniscectomy. *Orthop J Sports Med* 2016;**4**:2325967116676078.
- 24 Munro AG, Herrington LC. Between-Session Reliability of Four Hop Tests and the Agility T-Test. *J Strength Cond Res* 2011;**25**:1470.
- 25 Wilk KE, Arrigo C, Andrews JR, *et al.* Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in the female athlete. *J Athl Train* 1999;**34**:177–93.
- 26 Thomeé R, Werner S. Return to sport. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;**19**:1795–7.
- 27 Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors Used to Determine Return to Unrestricted Sports Activities After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2011;**27**:1697–705.
- 28 Hopper DM, Strauss GR, Boyle JJ, *et al.* Functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction: a longitudinal perspective. *Arch Phys Med Rehabil* 2008;**89**:1535–41.
- 29 Hartigan EH, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Time Line for Noncopers to Pass Return-to-Sports Criteria After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2010;**40**:141–54.
- 30 Ardern CL., Taylor NF., Feller JA., *et al.* 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. *Br J Sports Med* 2014;**48**:1543–52.
- 31 Thomeé R, Neeter C, Gustavsson A, *et al.* Variability in leg muscle power and hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;**20**:1143–51.
- 32 Lynch AD, Logerstedt DS, Grindem H, *et al.* Consensus criteria for defining ‘successful outcome’ after ACL injury and reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort investigation. *Br J Sports Med* Published Online First: 23 July 2013.
- 33 Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop* 1985;**43**–9.
- 34 Marx RG, Stump TJ, Jones EC, *et al.* Development and evaluation of an activity rating scale for disorders of the knee. *Am J Sports Med* 2001;**29**:213–8.

- 35 Rambaud AJM, Semay B, Samozino P, *et al.* 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* 2017;**7**:e015087.
- 36 Sturgill LP, Snyder-Mackler L, Manal TJ, *et al.* Interrater Reliability of a Clinical Scale to Assess Knee Joint Effusion. *J Orthop Sports Phys Ther* 2009;**39**:845–9.
- 37 Cleveland WS. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *J Am Stat Assoc* 1979;**74**:829–36.
- 38 Gustavsson A, Neeter C, Thomeé P, *et al.* A test battery for evaluating hop performance in patients with an ACL injury and patients who have undergone ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;**14**:778–88.
- 39 Cupido C, Peterson D, Sutherland MS, *et al.* Tracking Patient Outcomes after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Physiother Can* 2014;**66**:199–205.
- 40 Hegedus EJ, McDonough S, Bleakley C, *et al.* Clinician-friendly lower extremity physical performance measures in athletes: a systematic review of measurement properties and correlation with injury, part 1. The tests for knee function including the hop tests. *Br J Sports Med* 2015;**49**.
- 41 Hamilton RT, Shultz SJ, Schmitz RJ, *et al.* Triple-Hop Distance as a Valid Predictor of Lower Limb Strength and Power. *J Athl Train* 2008;**43**:144–51.
- 42 Nyberg B, Granhed H, Peterson K, *et al.* Muscle strength and jumping distance during 10 years post ACL reconstruction. *Isokinet Exerc Sci* 2006;**14**:363–70.
- 43 Harput G, Kilinc HE, Ozer H, *et al.* Quadriceps and Hamstring Strength Recovery During Early Neuromuscular Rehabilitation After ACL Hamstring-Tendon Autograft Reconstruction. *J Sport Rehabil* 2015;**24**:398–404.
- 44 Pistone E, Laudani L, Camillieri G, *et al.* Effects of early whole-body vibration treatment on knee neuromuscular function and postural control after anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized controlled trial. *J Rehabil Med* 2016;**48**:880–6.
- 45 Pua Y-H, Ho J-Y, Chan SA-S, *et al.* Associations of isokinetic and isotonic knee strength with knee function and activity level after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective cohort study. *The Knee* Published Online First: 21 July 2017.
- 46 Reid A, Birmingham TB, Stratford PW, *et al.* Hop Testing Provides a Reliable and Valid Outcome Measure During Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Phys Ther* 2007;**87**:337–49.
- 47 Hopper DM, Goh SC, Wentworth LA, *et al.* Test-retest reliability of knee rating scales and functional hop tests one year following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther Sport* 2002;**3**:10–8.
- 48 Petschnig R, Baron R, Albrecht M. The relationship between isokinetic quadriceps strength test and hop tests for distance and one-legged vertical jump test following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 1998;**28**:23–31.

2.3 LIENS ENTRE LA DATE DE REPRISE DE LA COURSE A PIED ET SES PARAMETRES BIOMECHANIQUES A 6 MOIS POSTOPERATOIRES D'UNE RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA.



Ce travail n’ayant pas encore fait l’objet d’une soumission dans une revue internationale anglophone, il est présenté en français mais en respectant la structure IMRaD.

Introduction

Après reconstruction chirurgicale du LCA, l’objectif de la plupart des patients est le retour au sport qu’il pratiquait avant sa blessure (Ardern CL. et *al.*, 2014). Ce retour se fait en 3 grandes étapes. La première comporte le retour à la course à pied comme vu précédemment (Ardern et *al.*, 2016). La deuxième grande étape est le retour au sport, où le sportif sera autorisé à réaliser des changements de direction, des actions de pivots et de contacts avec l’adversaire (van Melick et *al.*, 2016). Une batterie de tests est recommandée à 6 mois postopératoires pour aider à la décision du RTS (van Melick et *al.*, 2016).

Nous avons détaillé dans la partie 2.1 la disparité dans le moment choisi pour reprendre la course à pied. Celle-ci se déroule généralement autour du 3^{ème} mois postopératoire. Dans la partie 2.2, nous avons mis en lumière la grande variabilité de récupération fonctionnelle objectivée par les Hop Tests, au moment de ces dates de reprise de la course à pied, se normalisant aux alentours du 6^{ème} mois postopératoire. Ainsi, la date de reprise de la course à pied n’est donc pas standardisée : certains patients pourraient reprendre à 3 mois et d’autres à 4 mois postopératoires. Cependant, tous les patients espèrent reprendre les sports de pivots/contacts vers le 6^{ème} mois postopératoire. Cette différence de date de reprise de la course à pied pourrait avoir un impact sur la durée de l’étape “retour aux activités sollicitant peu le LCA” (première étape du RTS continuum (Ardern et *al.*, 2016)), et donc sur la durée de la réathlétisation. Cette étape importante, comprend en plus des exercices de renforcement musculaire et proprioceptif, un travail des filières aérobie et anaérobie grâce à la course à pied, travail préparatoire aux activités des étapes 2 et 3 du RTS continuum. Au moment de décider de la reprise du sport pivot/contact (étape 2 du RTS continuum), au 6^{ème} mois postopératoire, les patients pourraient donc avoir une durée de réathlétisation variant du simple au double. Cela pourrait avoir des conséquences sur la reprise du sport de compétition, et donc la réussite d’une reprise sportive complète.

Par ailleurs, la batterie de tests recommandée à 6 mois postopératoires comporte le plus souvent des questionnaires, un examen clinique, une évaluation musculaire, et des évaluations fonctionnelles (van Melick et *al.*, 2016). Pour caractériser l’asymétrie des membres inférieurs et définir des critères objectifs, il est souvent utilisé le LSI (“*Limb Symmetry Index*”). Cependant, il

surestime la récupération du patient (Wellsandt et al., 2017). En effet, il est très souvent observé une baisse de performance sur le membre sain et des altérations neuromusculaires sont constatées également des 2 côtés (Pairot de Fontenay et al., 2014; Pairot De Fontenay et al., 2015; Wellsandt et al., 2017). Il existe d'autres méthodes de calcul de symétrie, comme le "*Symmetry Index*" décrit par Robinson et Nigg (Robinson et al., 1987) permettant d'augmenter la sensibilité des index de symétrie des paramètres spatio-temporels par rapport au LSI (Błażkiewicz et al., 2014). De plus, lors du moment clé de la décision de la reprise du sport pivot/contact, dans ces batteries de tests, la course à pied n'est généralement pas évaluée alors qu'elle est la base de nombreux sports comportant des oppositions avec l'adversaire ou de brusques changements de direction. Il semble donc pertinent de faire une évaluation plus écologique s'intéressant au pattern de course à pied, et permettant de détecter les asymétries, responsables d'augmentations de risque de nouvelles blessures du LCA (Di Stasi et al., 2013) et de risque d'arthrose précoce (Andriacchi et al., 2004). En effet, Mazet et al. ont rapporté qu'il persistait des adaptations (augmentation de la raideur biomécanique du membre inférieur) à plus d'un an de la chirurgie lors de la course à pied (Mazet et al., 2016). Ainsi, une évaluation de la course à pied et de ses paramètres biomécaniques semblerait donc pertinente pour aider à la décision de reprise du sport.

Cependant, la date de reprise n'est pas uniforme (partie 2.1), variant entre le 2^{ème} et le 4^{ème} mois après la chirurgie. Ainsi, lors des évaluations réalisées au 6^{ème} mois, certains patients pourraient avoir repris la course à pied à 3 mois postopératoires, en bénéficiant d'environ 3 mois de travail de réathlétisation (à base de course à pied et de travail d'appuis), alors que d'autres ayant repris la course à 4,5 mois par exemple, auraient seulement 1,5 mois de réathlétisation. On peut donc alors se demander si la durée de la réathlétisation réalisée entre la reprise de la course à pied et le 6^{ème} mois postopératoire a une influence sur l'évaluation du pattern de course à pied ?

Ainsi, l'objectif principal de cette étude a été de définir les liens entre la date de reprise de la course à pied et ses paramètres biomécaniques chez des patients sportifs à 6 mois postopératoires d'une chirurgie du LCA. L'objectif secondaire était de tester les symétries/asymétries des paramètres biomécaniques des patients opérés du LCA à 6 mois postopératoires et d'établir ainsi des valeurs de référence. Pour cette étude, la biomécanique de la course a été abordée au travers du pattern de foulée (paramètres cinématiques de la foulée), des caractéristiques de production de force au sol à chaque pose de pied (paramètres cinétiques) et du comportement mécanique global du membre inférieur pendant la course (paramètres du modèle masse-ressort).

Méthodes

Les évaluations réalisées dans le cadre de cette étude font partie d'une étude prospective de suivi de cohorte (étude CR'STAL) dont le protocole est détaillé dans la partie 3.1. Les évaluations biomécaniques faisaient partie d'une batterie de test réalisé à 6, 9 et 12 mois postopératoires. Toutes les évaluations se déroulaient l'après-midi, entre 14 h et 18 h 30. À leur arrivée, les patients devaient remplir un consentement éclairé (ou le représentant légal pour les mineurs), en double exemplaire, avant de commencer les évaluations. Elles débutaient par une consultation afin de s'assurer des critères d'inclusion et de recueillir les mesures anthropométriques : âge, sexe, masse, taille, la date de la chirurgie, le type de plastie, le genou opéré et les lésions associées, ainsi que la date de reprise de la course à pied. L'évaluation de la course à pied sur tapis roulant instrumentalisé à 12 km/h était ensuite réalisée.

Considérations éthiques :

Cette étude entrait dans le cadre d'une évaluation des pratiques de « soins courants » de la loi du 9 août 2004, car, les actes pratiqués le sont de manière habituelle sans procédures invasives supplémentaires. Les évaluations utilisées sont couramment réalisées chez les patients sportifs dans le suivi après reconstruction du LCA du genou pour évaluer les capacités permettant la reprise du sport. Cette étude a bénéficié d'un avis favorable du comité d'éthique du CHU de St Etienne (IRBN522015/CHUSTE).

Population

Les patients ont été recrutés parmi les patients de l'unité de Médecine du Sport du service de Physiologie Clinique et de l'Exercice ou du service de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique du CHU de Saint Etienne en suivant les critères d'inclusion et d'exclusion présentés dans le Tableau 2.3-1.

Recueil des dates de reprise de la course à pied

La date de reprise de la course à pied était recueillie lors de la visite d'inclusion. La durée de pratique de la course à pied (Wrun), exprimée en semaines, a été calculée en soustrayant la date de l'évaluation à la date de reprise de la course à pied.

Évaluation du pattern de course à pied sur tapis roulant instrumenté à 12 km/h

Après un échauffement de 10-15 min sur bicyclette ergométrique et/ou footing selon les

préférences du patient, les évaluations de la course à pied étaient réalisées sur tapis roulant instrumentalisé (ADAL3D-WR ; Medical Development, HEF Tecmachine, Andrezieux-Boutheon, France).

Tableau 2.3-1. Tableau des critères d'inclusion et d'exclusion à l'étude CR'STAL

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<ul style="list-style-type: none"> -Patient sportif pratiquant un sport de pivot/contact avant la rupture du LCA. -Score supérieur à 11 sur l'échelle de Marx avant la blessure. -Score supérieur à 6 sur l'échelle de Tegner avant la blessure. -Rupture unilatérale du LCA. 	<ul style="list-style-type: none"> -Pathologie touchant le genou controlatéral -Re-rupture de la plastie du LCA -Patient n'ayant pas fini sa croissance osseuse ou ayant plus de 35 ans -Délais postopératoires < 6 mois -Persistance d'une douleur supérieure à 3 sur l'échelle visuelle analogique -Persistance d'un épanchement articulaire -Amplitude articulaire incomplète : F° inférieure à 90% de l'autre côté -Marche anormale -Contre-indication à la réalisation d'un des tests.

Les patients marchaient 2 minutes à 5 km/h, puis couraient 2 minutes à 8 km/h, puis 2 minutes à 10 km/h, et enfin 3 minutes à 12 km/h. Les acquisitions étaient réalisées après 1 minute de course à pied, sans en informer le patient, afin d'obtenir un pattern de course le plus naturel possible. Il était effectué un enregistrement de 20 secondes. La fréquence d'échantillonnage était de 1000 Hz. Les paramètres suivants étaient enregistrés : vitesse instantanée, composantes force verticale (vGRF) et horizontale (hGRF) de la force de réaction du sol. Après l'enregistrement, les données ont été filtrées grâce à un filtre Butterworth d'ordre 4 et une fréquence de coupure de 50 Hz. Le temps de vol (t_v) et le temps de contact (t_c) ont été ensuite calculés pour chaque pas du membre inférieur sain et du membre inférieur opéré (un seuil de 20 N sur vGRF a été utilisé pour détecter les phases de contact et de vol). Grâce à ces paramètres, nous avons calculé la longueur de la foulée. La moyenne de la longueur de la foulée du membre opéré a été calculée (Lstride_Op)

ainsi que celle du membre sain (L_{stride_Nop}). Nous avons fait de même pour le Temps de contact (Tc_Op et Tc_Nop) et le Temps de vol (Tv_Op et Tv_Nop).

Puis, en utilisant la méthode proposée par Morin et *al.* (Morin et *al.*, 2005), la raideur du membre inférieur (K_{leg}) (Figure 2.3-1) a été calculée (1) pour chaque appui des 2 membres inférieurs.

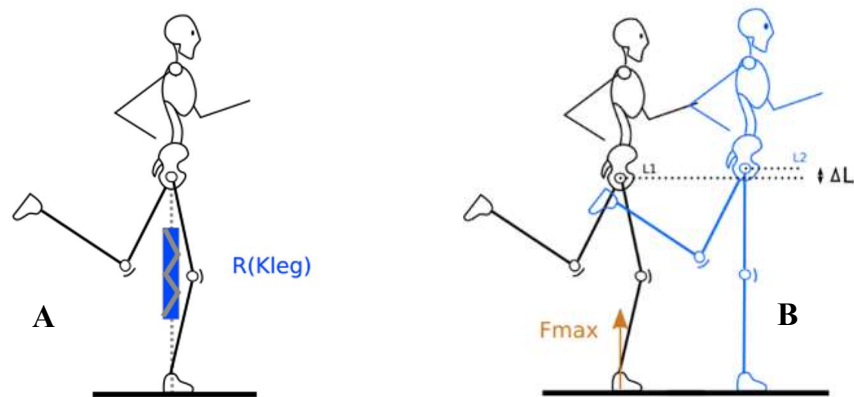


Figure 2.3-1. Raideur biomécanique du membre inférieur lors de la course à pied, pouvant être modélisée dans un système masse-ressort (A) et pouvant être calculée grâce la force maximum de réaction du sol et la différence de longueur du membre inférieur lors de l'appui (B).

$$K_{leg} = \frac{F_{max}}{\Delta L} \quad (1)$$

$$\text{avec } F_{max} = mg \frac{\pi}{2} \left(\frac{t_v}{t_c} + 1 \right)$$

$$\Delta L = L - \sqrt{L^2 - \left(\frac{v \times t_c}{2} \right)^2} + \Delta z$$

$$\text{avec } \Delta z = -\frac{F_{max}}{m} * \frac{t_c^2}{\pi^2} + g \frac{t_c^2}{8}$$

m : la masse du sujet (kg), $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, L : la longueur du membre inférieur (m), v : la vitesse (m.s^{-1})

Après analyse du signal du vGRF et découpage de chaque pas, nous avons calculé le pic actif (P_{actif}), valeur maximum du vGRF lors du pas, le pic passif s'il existait (P_{passif}) et le taux de chargement, c'est-à-dire la vitesse à laquelle vGRF augmente lors du début de la phase d'appui (appelé également Vertical Average Loading Rate (VALR) (Figure 2.3-2)) et caractérise très bien

l'impact absorbé par le membre inférieur lors du contact au sol) grâce à un script sur MATLAB (MATLAB 2015b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States).

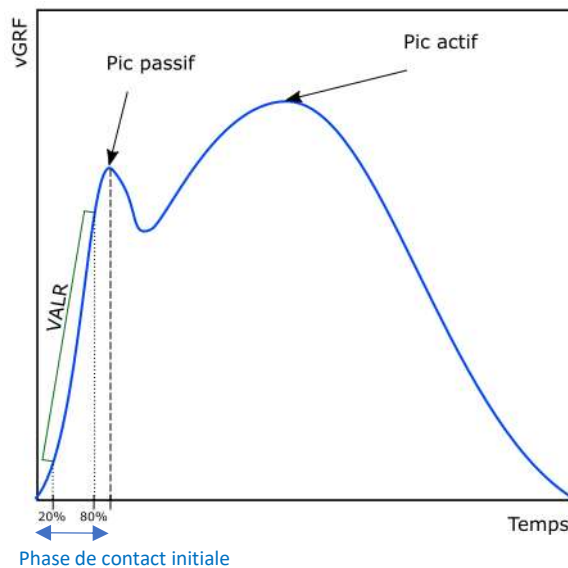


Figure 2.3-2. Force verticale de réaction du sol (vGRF) sur un pas lors de la course à pied, avec un pic passif apparaissant ou non dans la phase de contact initiale, puis un pic actif correspondant à la force maximale de vGRF (VALR : vertical average loading rate).

VALR correspondait au coefficient de la droite passant par le vGRF de 20 % et de 80 % de la phase de contact initial (Duquette and Andrews, 2010). Pour cela, nous avons mesuré le temps de la phase de contact initial entre son initiation (lorsque le vGRF atteint 20N)) et le pic passif. Si le pic passif n'existait pas, alors la phase initiale correspondait au 13 premiers % de la phase de contact (Pamukoff et *al.*, 2018), et le VALR était alors calculé comme précédemment.

Pour chaque membre inférieur, nous avons fait la moyenne du P actif (Pactif_Op et Pactif_Nop), du P passif (Ppassif_Op et Ppassif_Nop), de K leg (variable de raideur biomécanique du membre inférieur) KlegOp et KlegNop) et du VALR (VALROp et VALRNop). Nous avons ensuite calculé le ratio de symétrie (Limb Symmetry Index) (2) de ces paramètres biomécaniques, classiquement utilisé dans les évaluations fonctionnelles des patients opérés du LCA (Logerstedt, 2010) et l'indice d'asymétrie (AsymIndex) (3).

$$\text{Limb Symmetry Index} = \frac{X_{Op}}{X_{Nop}} \times 100 \quad (2)$$

$$AsymIndex = \frac{X_D - X_G}{(X_D + X_G) \times \frac{1}{2}} \times 100 \quad (3)$$

Comme le membre sain tend à s'adapter aux performances du membre opéré (Pairot de Fontenay et *al.*, 2014; Pairot De Fontenay et *al.*, 2015; Wellsandt et *al.*, 2017), et que chez les sujets sains, Pappas et *al.* n'ont pas retrouvé de différence significative entre les paramètres de raideur biomécanique du membre dominant/non-dominant (Pappas et *al.*, 2015), il nous a semblé donc préférable d'utiliser un indice global d'asymétrie. La valeur absolue de l'AsymIndex pourrait permettre d'objectiver globalement l'asymétrie du pattern de course à pied, et les adaptations globales des membres inférieurs. Nous avons donc également calculé l'indice d'asymétrie en valeur absolue (|AI|) pour chaque variable (4).

$$|AI| = \left| \frac{X_{Op} - X_{Nop}}{(X_{Op} + X_{Nop}) \times 1/2} \right| \times 100 \quad (4)$$

Analyse statistique

La saisie des données a été réalisée sur Excel 2011 14.4.9® (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Les statistiques descriptives, les tests de normalité et les corrélations entre les variables ont été réalisés sur le logiciel R (R Core Team (2018). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>).

Après avoir vérifié la normalité des échantillons par le test de Shapiro-Wilk, les tests de Student ou de Wicoxon-Mann-Whitney appariés ont été utilisés afin d'identifier les différences entre le genou opéré et le genou sain, concernant les variables biomécaniques. Les paramètres retenus pour l'analyse ont donc été : Wrun, les valeurs de Tc, Ta, Lstride, vGRFpeak, Kleg et VALR pour le côté sain et le côté opéré, et leur indice de symétrie (LSI et |AI|). L'hypothèse de normalité de l'échantillon a été confirmée par le test de Shapiro-Wilk. Les paramètres ont été exprimés selon la moyenne et l'écart-type. Un test de corrélation de Pearson a été effectué pour tester la relation entre Wrun et les valeurs des variables biomécaniques du côté sain, du côté opéré, de LSI, et de |AI|. Le seuil de significativité a été retenu à $p < 0,05$.

Résultats

Population

L'échantillon de patients analysés comprenait 26 patients qui ont été inclus dans la cohorte CR'STAL entre le mois de juin 2014 et le mois de janvier 2017. Il y avait 12 femmes et 14 hommes ($21,6 \pm 4,6$ ans, $174,6 \pm 9,8$ cm, $69,7,0 \pm 12,6$ kg). Leur niveau de pratique sportive était en moyenne de $14,3 \pm 2,2$ sur l'échelle de MARX (Marx et al., 2001) et de $8,6 \pm 0,9$ sur l'échelle de TEGNER (Tegner and Lysholm, 1985). Quatre patients avaient été opérés par la technique chirurgicale utilisant le tendon rotulien (technique de Kenneth-Jones) et 22 patients par la technique utilisant les tendons du semi-tendineux et gracile (technique du DIDT). Tous les patients avaient reçu la même rééducation standardisée (Annexe 1 de la partie 3.1).

Paramètres biomécaniques de la course à pied

Les moyennes, écarts types, médianes et écarts interquartiles (IQR) des variables calculées lors des évaluations sont résumés dans le tableau 2.3-2.

Il existait des différences significatives entre le genou opéré et le genou sain pour les variables de longueur du pas moyen (différence de 0,02cm, $p < 0,001$), pour le Tc moyen (différence de -5,12 ms, $p = 0,002$), pour le pic actif moyen (différence de -0,06 BW, $p = 0,007$), et pour la raideur biomécanique moyenne du membre inférieur (différence de 0,5 kN/m, $p = 0,008$).

Tableau 2.3-2. Tableau des valeurs globales des membres inférieurs (valeur moyenne du score du membre opéré et du membre sain) des valeurs de symétrie pour les variables biomécaniques lors d'une évaluation sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur.

	Genou sain	Genou opéré			LSI(en %)	AsymIndex (en %)
	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)	Différence	p=	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)
Lstep (en m)	1,20(0,06)	1,15(0,05)	-0,02	<0,001 ***	98,4(2,3)	2,2(1,9)
Tc (en ms)	235,2(14,4)	230,1(13,2)	-5,1	0,002 **	97,9(3,2)	3,2(2,2)
Tv (en ms)	114,4(14,7)	113,8(12,5)	-0,6	0,55	99,8(4,4)	3,7(2,5)
P actif (en BW) β	2,5(0,2)	2,4(0,2)	-0,1	0,007 **	97,5(4,8)	4,7(2,8)
P passif (en BW) β	1,8(0,3)	1,8(0,3)	0,00	0,8	101,7(8,4)	6,1(5,3)
VALR (en BW/s)	78,0(22,1)	75,4(24,6)	-2,7	0,11	96,1(10,4)	8,6(8,1)
Kleg (en kN/m) β	10,6(2,1)	11,1(1,9)	0,5	0,008 **	105,4(8,5)	7,9(5,3)

β : test de Wilcoxon et Mann-Whitney; *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$

LSI : Limb Symmetry Index ; AsymIndex : Asymmetry Index ; ET : écart type ; IQR : inter quartile range ; Lstep : Longueur de la foulée moyenne ; Tc : Temps de contact moyen ; Tv : Temps de vol moyen ; P_actif : Pic actif moyen ; P_passif : Pic passif moyen ; VALR : vertical loading rate moyen ; Kleg : raideur biomécanique du membre inférieur moyenne .

Pattern de course et délai de reprise de la course

Il existait une corrélation significative entre Wrun et Lstride des membres opérés et sains (respectivement $r = 0,43$; $p = 0,03$; et $r = 0,42$; $p = 0,03$), mais pas avec les autres paramètres biomécaniques (Figure 2.3-3). Ces corrélation significatifs étaient modérées (échelle de Cohen.(Cohen 1998))

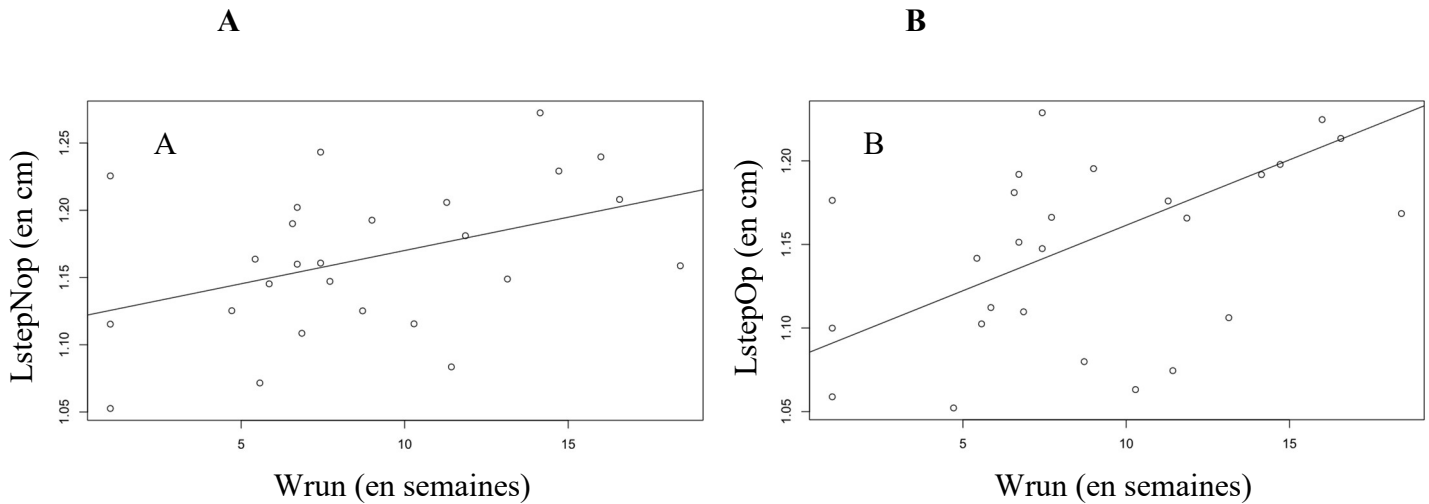


Figure 2.3-3. *Corrélation entre la durée de reprise de la course à pied (Wrun) et la moyenne de la longueur du pas du membre sain (A) et opéré (B) lors d'une évaluation de la course à pied à 12 km/h sur tapis roulant instrumenté, après reconstruction chirurgicale du LCA.*

Discussion

Dans notre étude, la durée de pratique de la course à pied (Wrun) était seulement en lien avec la longueur de la foulée du membre inférieur opéré et non-opéré. Ainsi, la date de reprise de la course à pied n'aurait, à la lumière des résultats de cette étude, pas influencé la symétrie des paramètres biomécaniques.

La corrélation positive retrouvée entre Wrun et Lstep nous indiquerait que plus les patients reprenaient tôt la course à pied, plus leur longueur de foulée était grande. Cela pourrait correspondre avec ce que l'on observe en pratique clinique. En effet, lorsque le patient est autorisé à reprendre la course à pied, il doit alors modifier ces stratégies motrices mises en place pour la marche pour les adapter à la course à pied. Cela se produit notamment en diminuant les amplitudes de flexion de genou et en utilisant la force propulsive des muscles de la cheville, principalement le triceps sural (Gazendam and Hof, 2007). Les contraintes sur la greffe sont faibles lors de cette nouvelle activité (0,62N/BW (Roldán et al., 2017)), mais contraignantes pour l'articulation fémoro-tibiale (7,83 BW et presque 3 fois plus importantes que la marche (Saxby et al., 2016b)). Ainsi, on peut penser que le patient reprenant cette activité diminue la longueur de sa foulée pour

diminuer les contraintes articulaires et musculaires (Brughelli et *al.*, 2011; Morin et *al.*, 2007), lui permettant de s'adapter à cette nouvelle tâche motrice de façon globale, sans différence entre les deux membres inférieurs.

Bowersock et *al.* ont également retrouvé des adaptations similaires chez des patients, 2 ans après leur opération, qui diminuaient de 5 % la longueur de leur foulée de course à pied afin de diminuer les contraintes fémoro-patellaires et fémoro-tibiales. Ces résultats vont donc dans le sens des corrélations retrouvées dans notre étude entre la durée de reprise de la course à pied et la longueur de la foulée lors de l'évaluation biomécanique réalisée à 6 mois postopératoires, même si nos résultats sont à prendre avec une certaine précaution étant donné la faible corrélation retrouvée.

La relation retrouvée dans notre étude pourrait sûrement être mieux décrite que par une relation linéaire, et il semblerait qu'il existe un effet plafond (Renner et *al.*, 2018), comme dans les modèles de croissance utilisés pour décrire la récupération fonctionnelle après reconstruction chirurgicale du LCA (Cupido et *al.*, 2014; Hopper et *al.*, 2008). Cependant la longueur de la foulée pourrait être un indicateur indirect de la tolérance de l'articulation à la contrainte mécanique : moins le genou serait capable de tolérer une contrainte importante, plus le patient adopterait (inconsciemment) une longueur de la foulée faible par rapport à un seuil normal afin de protéger son articulation. En effet, une foulée plus longue implique un temps de vol plus long, et donc un déplacement vertical plus important pendant la phase aérienne induisant une vitesse verticale d'arrivée au sol plus élevée. Il semble donc nécessaire de définir les paramètres de foulée normale (soit valeur normative dans la population, soit valeur avant blessure), afin d'utiliser le paramètre de longueur de foulée comme indicateur de tolérance à la contrainte mécanique et donc comme indicateur de récupération fonctionnelle du genou après reconstruction chirurgicale du LCA.

Afin de mieux définir la relation entre la longueur de la foulée et la durée de reprise de la course à pied, il serait nécessaire d'avoir un suivi prospectif, avec des mesures répétées des paramètres de longueur de foulée pendant la phase de retour à la course à pied chez cette population. Le management du retour à la course à pied pourrait s'inspirer de cette relation contrainte articulaire/longueur de foulée afin d'optimiser le retour à la course à pied. Ainsi, en plus des conseils dans les paramètres de temps et de vitesse, les cliniciens pourraient également proposer une fréquence de foulée majorée (donc une diminution de la longueur de la foulée si la vitesse est constante) permettant une reprise de la course à pied adaptée aux capacités de l'articulation du genou.

Comme retrouvé dans plusieurs études (Pamukoff *et al.*, 2018; Patras *et al.*, 2009, 2010; Perraton *et al.*, 2018; Tashman *et al.*, 2007; Thomson *et al.*, 2018), nous avons constaté que le pattern de la course à pied était modifié après reconstruction chirurgicale du LCA à 6 mois postopératoires. En effet, la cinématique de la marche et de la course à pied ont été rapportées comme retournant à la normale seulement après les 12 mois postopératoires (Karanikas *et al.*, 2009). Cependant, dans cette même étude de Karanikas *et al.*, malgré l'absence de différence significative observée dans la cinématique de marche et de course (9 km/h), des déficits de force des fléchisseurs de hanche et des fléchisseurs et extenseurs de genou (17% des extenseurs et de 9 % des fléchisseurs de genou) étaient observés 2 ans après la chirurgie (Karanikas *et al.*, 2009). Il semblerait donc que malgré un déficit de force de la jambe opérée, les patients arrivaient à avoir une certaine symétrie lors de la course à pied à vitesse faible (9km/h), sûrement par adaptation du membre sain en fonction du membre opéré. La tâche demandée ne demandant pas une performance suffisante pour objectiver la différence entre les deux membres inférieurs, cette adaptation pourrait également expliquer cette symétrie retrouvée.

Thomson *et al.* (Thomson *et al.*, 2018) se sont intéressés à deux paramètres biomécaniques de la course à pied (temps de contact et la force maximum de réaction au sol (pic actif)) dans une série de cas de patients footballeurs, opérés d'une reconstruction chirurgicale du LCA, en comparaison avec un groupe contrôle apparié. Ces patients ont été divisés en deux groupes : un groupe étant à moins de 9 mois postopératoires (ACLR<9, n=11) et un groupe à plus de 9 mois postopératoires (ACLR>9, n=5). Dans cette étude, ils ont évalué les paramètres biomécaniques à différentes vitesses : 12, 14 et 16 km/h sur un tapis instrumenté, retrouvant toujours la même différence significative inter-groupe : la différence (entre le membre opéré et le membre sain) du pic actif mesurée était plus grande de façon significative entre le groupe ACLR<9 et le groupe ACLR>9 et également entre le groupe ACLR<9 et le groupe contrôle. Il est à noter qu'il n'existait pas de différence significative entre le groupe contrôle (n=16) et le groupe ACLR>9, mais ces résultats étaient à considérer avec précaution au vu du faible nombre de patients dans le groupe ACLR>9 (n=5). Nous pouvons tout de même en déduire que la normalisation du pic actif se ferait sûrement après les 9 mois postopératoires, et que la vitesse de 12km/h était suffisante pour mettre en lumière les adaptations biomécaniques de patients opérés du LCA.

Dans cette même étude, Thomson *et al.* (Thomson *et al.*, 2018) se sont intéressés également au temps de contact (Tc) et à sa différence entre le membre opéré et sain. Il existait une différence significative plus grande pour le groupe ACLR<9 que pour le groupe contrôle, mais seulement à la vitesse la plus élevée : 16km/h. Le Tc étant fortement corrélé avec Kleg (Morin *et al.* 2007), il

serait intéressant de savoir si la différence de Kleg entre le membre sain et opéré était également présente au sein des 3 groupes dont l'étude fait référence. Si tel était le cas, cela monterait alors qu'il existait une normalisation de Kleg après les 9 mois postopératoires, et que la chirurgie aurait un impact sur Kleg, rendant variable cette valeur lors de vitesse plus élevée. Cela permettrait de mettre encore plus l'accent sur la relation entre Kleg et la récupération fonctionnelle après chirurgie du LCA.

Nos résultats et ceux des deux études précitées nous donnent des perspectives intéressantes sur la compréhension de l'adaptation du pattern de course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA. Il y aurait peut-être un seuil de force musculaire, ou de récupération fonctionnelle, pour lequel le patient compense ou non, et qui permettrait une relative symétrie lors de la course à pied à vitesse faible comme 12km/h. La relative facilitée de calcul de Kleg sur un tapis roulant (grâce à des applications sur smartphone (runmatic (Balsalobre-Fernández et al., 2017; Rodríguez, 2018)), ou à des cellules photoélectriques (optojump® (Ammann et al., 2016)) pourrait permettre aux cliniciens de monitorer le retour à la course à pied grâce à la mesure de la symétrie de Kleg, soit par le ratio LSI, communément utilisé, soit par l' $|AI|$, plus sensible et objectivant le déficit observé entre les deux membres inférieurs.

L'objectif secondaire était de fournir les références normatives des variables biomécaniques les plus courantes du pattern de course, chez des patients opérés d'une reconstruction chirurgicale du LCA. Nous avons observé que les LSI étaient compris entre 95% et 100% pour tous les paramètres, sauf pour le Pic passif ($101,7 \pm 8,4$ %) et Kleg ($105,4 \pm 8,5$ %). Pour Kleg, le calcul du LSI devrait être inversé (membre sain divisé par le membre opéré), pour permettre une meilleure lecture et comparaison par rapport aux autres paramètres. En effet, le Kleg du membre opéré était supérieur à celui du membre sain de façon significative (différence de 0,50 ; $p=0,008$) (5). L'utilisation de l' $|AI|$ pourrait permettre d'éviter cette inversion dans le calcul de la symétrie, diminuant le risque d'erreur et d'interprétation.

$$LSI(Kleg) = \frac{Kleg_{sain}}{Kleg_{opéré}} \times 100 \quad (5)$$

Pour le Pic passif, cela est plus discutable, car il semble qu'il y ait une certaine symétrie, avec une différence moyenne plutôt faible et non significative (différence de 0,02 BW et $p = 0,8$).

Les LSI étant compris entre 97,9% et 105,4%, le pattern de course à pied des patients de notre cohorte était relativement symétrique. Cette relative symétrie est également retrouvée chez les sujets sains, au niveau des paramètres biomécaniques spatiotemporels lors de la course à pied, sans influence du pied dominant, même après fatigue (Pappas *et al.*, 2015). Les $|AI|$ étaient compris entre 2,2 et 8,6%. Les plus élevés étant ceux de VALR ($|AI|=8,6\pm 8,1\%$) et de Kleg ($|AI|=7,9\pm 5,3\%$). Nous remarquons donc que l' $|AI|$ permet de mieux objectiver l'asymétrie que le LSI classiquement utilisé.

Aux vues de la quasi-symétrie de la course à pied et des faibles différences entre le membre opéré et sain, l'utilisation du LSI semble moins adaptée que l'AsymIndex. En effet, l'AsymIndex est plus sensible aux écarts de différences, et prend en compte la performance de l'individu. La valeur absolue de l'AsymIndex ($|AI|$) permet également de prendre en compte les surcompensations du membre opéré, par rapport au membre sain. Ainsi, il semble intéressant d'évaluer globalement la symétrie du pattern de course à pied et d'utiliser l' $|AI|$ pour mettre en lumière les différences existantes de certains paramètres biomécaniques chez le sujet pathologique. L' $|AI|$ semble donc un indice de symétrie à privilégier pour les futures études s'intéressant au pattern de course à pied chez des patients après reconstruction chirurgicale du LCA.

Dans cette étude, il ressort clairement que les patients adaptaient leur pattern de course à pied avec une relative symétrie, en fonction de leur capacité à absorber les contraintes articulaires, sauf pour Kleg. Ce paramètre semble donc pertinent pour le monitoring du RTS continuum. De plus, ce paramètre n'était pas en lien avec la date de reprise de la course à pied, son évaluation durant la batterie de tests à 6 mois postopératoires pourrait être un moyen d'améliorer la décision du retour au sport.

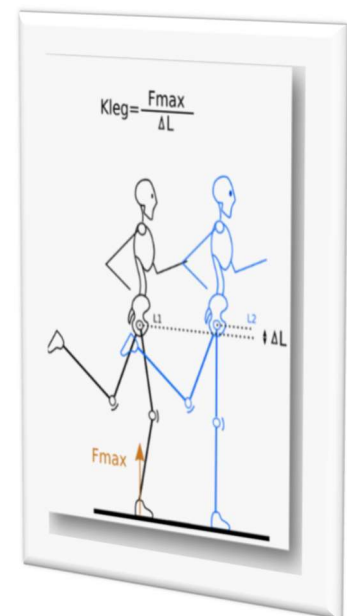
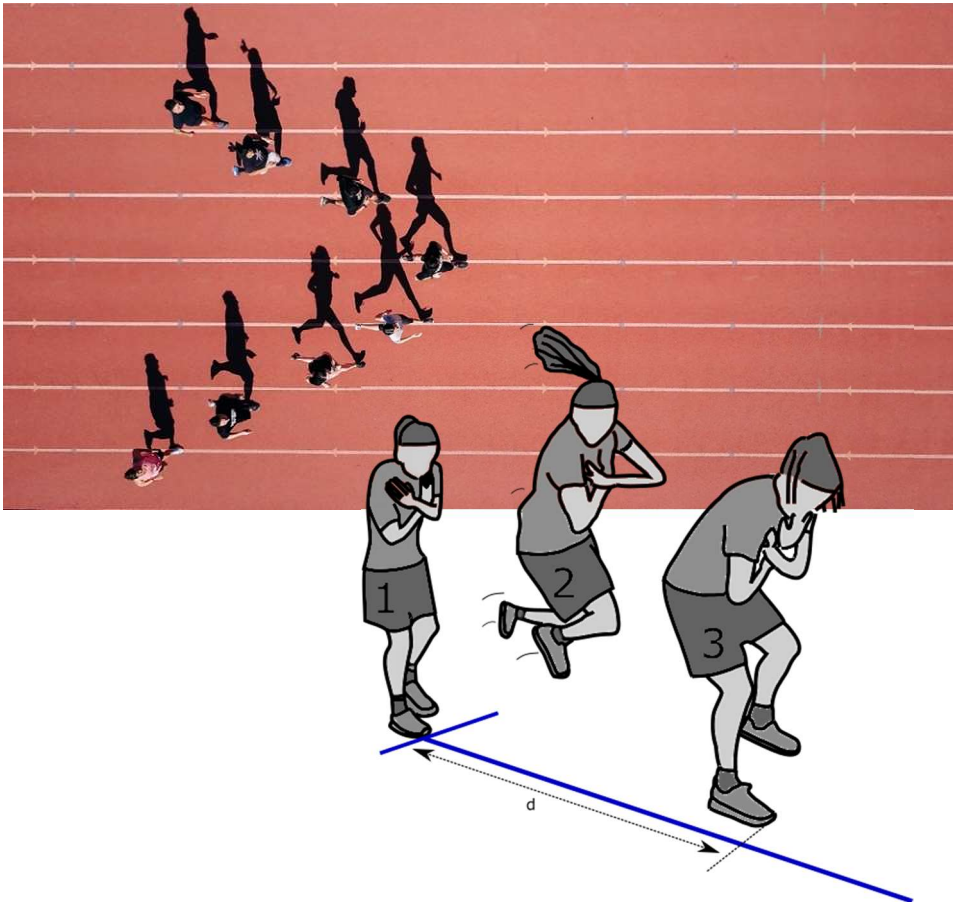
Les limites de notre étude étaient notamment le faible échantillon de patients inclus. Un nombre plus important de patients permettrait d'avoir une puissance statistique supérieure, mais aussi d'avoir une analyse plus fine en prenant en compte d'éventuels facteurs confondants (statut de récupération fonctionnelle, sexe, sports...). Certains de nos résultats sont à analyser avec précautions. Les corrélations retrouvées entre la longueur de foulée et le temps de reprise de la course à pied étaient significatives mais modérées, et même si d'autres études retrouvaient des adaptations similaires, une étude prospective avec recueil de la date précise du début de la course à pied permettrait de mieux quantifier le lien entre la longueur de foulée et l'exposition de l'activité de la course à pied. Il se pourrait que la normalisation de la longueur de foulée à la longueur du membre inférieur ou à la taille de l'individu pourrait également affiner cette relation.

Au niveau des paramètres biomécaniques, les valeurs de VALR du membre opéré et sain des individus avaient une grande variabilité ($78,0 \pm 22,1$ BW/s et $77,1 \pm 28,5$ BW/s) et ces valeurs ne peuvent être généralisées pour la population de patients opérés du LCA, à 6 mois postopératoires. En effet, VALR dépend de la pose de pied lors du contact initial, du chaussant, et de la surface de course (An et *al.*, 2015; Besier et *al.*, 2001; Giandolini et *al.*, 2013a, 2013b; Kulmala et *al.*, 2013). De plus, Bowersock et *al.* ont calculé ce paramètre dans une population de patients après plus de 2 ans d'une opération du LCA ($98,7 \pm 18,9$ BW/s et $93,3 \pm 21,7$ BW/s respectivement pour le côté sain et le côté opéré), et ont retrouvé un VALR supérieur à nos valeurs ($78,0 \pm 22,1$ BW/s et $75,4 \pm 24,6$ BW/s, respectivement pour le côté sain et le côté opéré). Cependant, les techniques de mesure étaient différentes entre notre étude et la leur (mesures spatio-temporelles pour Bowersock et mesures des forces de réaction de sol grâce à un tapis instrumenté pour notre étude). Toutefois, si nous calculons le ratio de LSI et l' $|AI|$ pour leurs résultats, nous obtenons 94,5% et 5,6%, résultats proches à nos résultats (96,1% et 8,6%).

Conclusion

Nous n'avons pas mis en évidence d'influence de la date de reprise de la course à pied sur la symétrie observée lors d'une évaluation biomécanique du pattern de course chez des patients après reconstruction chirurgicale de LCA. Cependant, il existait un lien entre la durée de reprise de la course à pied et la longueur de la foulée des 2 côtés. La corrélation positive retrouvée entre ces deux variables pourrait nous indiquer que plus les patients avaient repris tôt la course à pied, plus leur longueur de foulée était grande. Cette adaptation de la foulée serait en lien avec l'adaptation de l'articulation du genou aux nouvelles contraintes induites par la course à pied. Ceci est cohérent avec des stratégies de protection des membres inférieurs, chez des patients ayant repris depuis peu de temps la course à pied et maîtrisant peu cette activité. Ainsi, il semble important d'en tenir compte dans le management de cette activité qui prépare à la prochaine étape du retour au sport.

2.4. SYNTHÈSE SUR LA DÉCISION DE LA REPRISE DE LA COURSE À PIED APRÈS RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA



Ces trois études ont permis d'apporter des informations importantes pour répondre à notre problématique concernant la décision de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA.

Dans notre première étude, nous avons réalisé une scoping review des critères de reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA. Le plus souvent, la reprise se faisait en suivant le délai postopératoire indiqué dans le protocole de rééducation. Ce critère de temps était le plus souvent rapporté à 3^{ème} mois postopératoire. Les rares études qui proposaient des critères objectifs (1 sur 5) rapportaient que la reprise de la course à pied devait se faire après un examen clinique, une évaluation de la force musculaire, et/ou en association avec des tests fonctionnels comme les Hop Tests.

Dans notre deuxième étude, nous avons évalué la récupération fonctionnelle grâce aux Hop Tests pendant la phase de retour à la course à pied jusqu'à un an postopératoire. Nous avons observé que le LSI des Hop Tests, en lien avec la récupération fonctionnelle, augmentait en suivant une courbe de croissance qui se stabilisait, vers les 12 mois postopératoires. A cette date-là, le LSI moyen atteignait un score d'environ 97%, avec une faible variabilité (InterQuartile Range : IQR=6,1%). Au contraire, entre le 3^{ème} et le 4^{ème} mois postopératoires, dates où les patients reprenaient le plus souvent la course à pied, nous avons observé que les résultats des Hop Tests présentaient une grande variabilité inter-patients. Au 3^{ème} mois, la moyenne des LSI du SHT et THT était de 85%, avec un IQR de 17%, et au 4^{ème} mois, la moyenne était de 88%, avec un IQR de 14%. À noter que pour le SHT, la moyenne était de 84% avec un IQR de 20% pour le 3^{ème} mois, et une moyenne de 88% avec un IQR de 20%. Ces IQR très élevés montraient la grande variabilité des résultats aux Hop Tests à ces dates. Ces résultats nous faisaient suggérer l'importance d'individualiser la décision de la reprise de la course à pied, sur la base d'une évaluation objective de la récupération fonctionnelle et non simplement un délai postopératoire.

Dans notre troisième étude, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la course à pied à 6 mois postopératoires. Nous avons cherché l'influence de la durée de la reprise de la course à pied sur le pattern de course. Les patients inclus dans cette étude n'avaient pas tous repris la course à pied à 3 mois postopératoires : certains l'avaient reprise seulement au 4^{ème} mois, voire plus tard en fonction des protocoles et de l'assiduité des patients à la rééducation. La date de reprise de la course à pied était corrélée, mais faiblement, avec la longueur moyenne de la foulée pour les deux membres inférieurs, mais il n'y avait pas de liens entre la date de la reprise de la course à pied et la symétrie des variables biomécaniques mesurées. Nous avons émis l'hypothèse que l'adaptation

du pattern de course pourrait se faire de façon globale, répondant aux changements de contraintes articulaires induits par la course à pied et sa progression.

À la lumière des résultats de nos travaux, il semble que la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA soit encore, dans la littérature scientifique, une étape banalisée dans la prise en charge des patients, fondue dans la prise en charge rééducative, et que la contrainte spécifique de cette activité ne soit pas réellement prise en compte. En effet, la majorité des auteurs utilisaient simplement un délai postopératoire et non une évaluation fonctionnelle objective pour décider de la course à pied. Or nous avons pu mettre en évidence la variabilité inter-individuelle de la récupération fonctionnelle, et certaines adaptations du pattern biomécanique face aux nouvelles contraintes articulaires induites par la reprise de la course à pied. Ainsi, il semble donc peu adapté de proposer en systématique à tous les patients la date du 3^{ème} mois pour la reprise de la course à pied. Nous pensons que cette reprise doit être individualisée en fonction du statut de récupération de chaque patient. Les Hop Tests, tests simples, rapides et précis, pourraient être utilisés afin d'aider à cette décision, en s'incluant dans une batterie de tests comprenant un examen clinique et une évaluation musculaire. Une évaluation individuelle et objective de la récupération fonctionnelle, à l'image de ce qui est recommandé pour la reprise du sport de pivot contact (van Melick et *al.*, 2016) et comme décrit dans 1/5 des études incluses dans notre scoping review, nous semble être la stratégie la plus pertinente pour déterminer cette reprise dans l'objectif d'une balance bénéfice/risque positive pour le patient.

Cependant, certaines limites sont à mentionner. Il est retrouvé plusieurs modalités pour effectuer le SHT, comme avec ou sans les membres supérieurs, sans ou après exercices de fatigue par exemple. Ces modalités pourraient influencer les résultats du LSI et donc fausser les critères de reprise du sport déjà décrits. Il faut également noter que notre recueil de dates de reprise de la course à pied était déclaratif. La course à pied se faisant par étape progressive, cette date déclarée peut être différente pour un patient par rapport à l'autre, le sportif pensant que l'activité de course à pied est réalisée qu'à partir d'une certaine durée de course, et aurait pu engendrer des variabilités inter-patients venant biaiser nos résultats. Il convient donc, pour les études à venir, de déterminer et de détailler la définition de la reprise du sport. Enfin, nous avons eu malheureusement des difficultés de recrutement ce qui ne nous a pas permis d'avoir des échantillons plus importants et qui a probablement limité la puissance de nos études. Ces difficultés de recrutement ont pu être liées aux critères d'inclusions relativement stricts et restrictifs, mais qui ont été définis afin

d'analyser une population spécifique correspondant à la population la plus à risque de récurrence de rupture du LCA (Montalvo et *al.*, 2018).

Les résultats de ces premiers travaux ont permis d'élargir le champ des connaissances dans le domaine de la reprise de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA, mais aussi d'émettre de nouvelles perspectives de recherches, comme par exemple la poursuite des travaux expérimentaux de suivi de cohorte avec la constitution d'une cohorte incluant un plus grand nombre de patients afin de confirmer ou infirmer nos résultats. Une nouvelle étude incluant par exemple, lors de la phase de reprise de la course à pied, un recueil de la date de reprise avec une définition plus précise, des évaluations biomécaniques sur tapis roulant instrumentalisé de la longueur de la foulée et de la mesure du temps de contact et temps de vol, en plus des Hop Tests, permettrait de monitorer cette phase. Des études supplémentaires sont également nécessaires sur la passation du SHT afin de déterminer la meilleure méthode pour réaliser cette évaluation et donc suivre la récupération fonctionnelle. Il semble aussi important de définir précisément les critères objectifs, fonctionnels et biomécaniques précédemment citées, qui pourraient guider et aider à la décision d'autorisation de la reprise de la course à pied, grâce à une étude prospective. Elle recueillerait lors de l'examen clinique des 6 mois postopératoires, les déficits retrouvés lors de ces évaluations et des éventuelles complications liées à la phase de retour à la course à pied. Grâce à une analyse incluant notamment des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) de nouveaux critères pourraient être proposés. Enfin, un essai randomisé contrôlé permettrait d'évaluer l'efficacité d'un algorithme de décision de reprise de la course à pied, basé sur des évaluations objectives, en comparaison à la pratique habituelle, sur la survenue de nouvelle blessure dans les suites du retour à la course à pied et du retour au sport en général.

Partie III :

La course à pied, critère de retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA.

La publication en lien avec cette partie est la suivante :

Rambaud AJM, Semay B, Samozino P, Morin J-B, Testa R, Philpott R, Rossi J, Edouard P. 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* 2017;7:e015087.

La décision de la reprise du sport pivot/contact est une décision délicate (Arderm. et *al.*, 2014). Il est recommandé d'utiliser une batterie de tests pour s'aider et prendre la décision la plus optimale possible et permettant le meilleur rapport bénéfice / risque pour le patient (van Melick et *al.*, 2016). De nombreuses batteries de tests ont été proposées pour aider cette décision de reprise du sport pivot/contact (Barber-Westin and Noyes, 2011b; Grindem et *al.*, 2016; Kyritsis et *al.*, 2016). Elles comportent toutes des critères de temps (pas avant 6 mois postopératoires) et s'accompagnent de critères cliniques. Elles s'accompagnent également de questionnaires afin d'appréhender la kinésophobie et l'appréhension à la reprise du sport, d'évaluations de la force musculaire du quadriceps et des ischio-jambiers, et/ou de tests fonctionnels comme les Hop Tests. Ces batteries de tests ont pour objectif d'avoir une évaluation globale, le plus large possible des capacités du patient. Elles doivent prendre en compte le plus grand nombre de facteurs intervenants dans la genèse d'une nouvelle blessure, afin de la prévenir.

Nous avons vu précédemment l'importance de la course à pied dans la reprise du sport, qui est en effet, l'activité de base pour la majorité des sports au sens large. C'est une activité peu contraignante pour la plastie du LCA (Roldán et *al.*, 2017), mais un manque de récupération fonctionnelle (amplitudes, douleurs résiduelles, force musculaire) semble impacter la course avec l'apparition d'une boiterie (déficience de la biomécanique de la course à pied) (Tashman et *al.*, 2007), voire de blessure (Di Stasi et *al.*, 2013). Comme mentionné, il existe des adaptations biomécaniques du genou opéré, à 6 mois de la chirurgie, et plusieurs études ont décrit la persistance d'adaptation du pattern de course 2 ans après la chirurgie (Capin et *al.*, 2017; Perraton et *al.*, 2018; Waite et *al.*, 2005). Ainsi le facteur de temps ne suffit pas, à lui seul, à gommer ces adaptations, et elles pourraient avoir une influence sur la reprise du sport de pivot/contact et l'apparition de nouvelles blessures. Malgré cela, aucune étude ne propose une évaluation de la course à pied pour guider la décision de reprise du sport.

Dans ce contexte, il nous semble important d'évaluer la biomécanique de la course à pied, notamment dans le cadre de reprise de sport de pivot/contact. Cette évaluation peut inclure notamment l'analyse de la symétrie du pattern de course à pied, mais aussi l'analyse de la longueur de foulée et Kleg comme vu précédemment.

Ainsi, dans cette 3^{ème} partie de travail de thèse, nous nous proposons de répondre aux questions suivantes : « **Est-ce qu'une évaluation biomécanique de la course pourrait aider à**

la décision de la reprise du sport avec pivot/contact ? Les altérations biomécaniques pourraient-elles jouer un rôle dans la survenue de nouvelles blessures ? ».

Pour cela, nous avons dans un premier temps défini un protocole de recherche ayant pour objectif de déterminer le ou les paramètres, ou l'association de paramètres (incluant la course à pied) permettant d'aider à la décision de reprise du sport pivot/contact en minimisant le risque de récurrence de rupture du LCA ou de nouvelle blessure (étude CR'STAL (Criteria for Return to Sport after ACL reconstruction)) (Partie 3.1).

Dans un second temps, nous avons comparé les paramètres biomécaniques des patients de la cohorte CR'STAL à 6 mois postopératoires avec les données de sujets témoins sains et appariés, afin de déterminer les éventuelles modifications de la biomécanique de la course chez les patients opérés du LCA (Partie 3.2).

Et enfin, nous avons analysé les résultats préliminaires de l'étude CR'STAL, et notamment les éventuelles différences biomécaniques, entre les patients qui ont eu une nouvelle rupture du LCA, et ceux qui n'en ont pas eu dans les suites de la reprise du sport après reconstruction chirurgicale du LCA (Partie 3.3).

3.1. CRITERIA FOR RETURN TO SPORT AFTER ACL RECONSTRUCTION: ÉTUDE CR'STAL



Résumé et synthèse de l'article

La décision de retour au sport après une reconstruction chirurgicale du LCA est une étape importante. De nombreuses évaluations ont été utilisées pour aider à la décision de retour au sport pivot/contact (Barber-Westin and Noyes, 2011b; Grindem *et al.*, 2016; Kyritsis *et al.*, 2016), mais sans qu'aucune ne fasse consensus. Malheureusement, il existe de nombreuses récurrences de ruptures du LCA au cours de la première année post-chirurgicale (Murray *et al.*, 2013), correspondant à la phase de retour au sport pivot/contact pour la plupart des patients. Il est donc important d'avoir de meilleurs outils pour aider à la décision du retour au sport et d'accompagner les patients dans cette phase délicate.

Dans ce contexte, notre objectif a été d'analyser les relations entre le risque de nouvelle blessure du LCA, et les différents critères couramment utilisés pour le suivi de retour au sport, associé aux évaluations biomécaniques de la course à pied.

Nous avons donc proposé un protocole expérimental pour répondre à cet objectif : l'étude CR'STAL (Criteria for Return to Sport after ACL reconstruction). C'est une étude prospective de suivi de cohorte, avec des évaluations répétées à 6, 9 et 12 mois après reconstruction chirurgicale du LCA, associé à un recueil des blessures jusqu'à 36 mois postopératoires. Le protocole d'évaluation comporte un examen clinique, des questionnaires algofonctionnels, des questionnaires évaluant la kinésophobie, une évaluation mécanisée de la laximétrie par GNRB®, des tests de l'équilibre et de la proprioception, une analyse biomécanique de la course à pied, des Hop Tests, et une évaluation musculaire isocinétique des extenseurs et fléchisseurs du genou. Cette étude a reçu l'approbation par le Comité d'éthique du Centre Hospitalo-Universitaire de Saint-Etienne (numéro de référence IRBN522015 / CHUSTE).

Dans l'article intitulé : « 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 », nous avons détaillé le protocole mis en place, ainsi que l'analyse statistique innovante, adaptée aux nombreuses variables étudiées, et ayant pour objectif de déterminer de nouveaux critères.

Article en version originale anglaise et son annexe

BMJ Open 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

Alexandre J M Rambaud,^{1,2} Bertrand Semay,^{1,3} Pierre Samozino,⁴ Jean-Benoît Morin,⁵ Rodolphe Testa,¹ Rémi Philippot,^{1,3} Jérémy Rossi,¹ Pascal Edouard^{1,6}

To cite: Rambaud AJM, Semay B, Samozino P, *et al*. 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* 2017;7:e015087. doi:10.1136/bmjopen-2016-015087

► Prepublication history and additional material for this paper are available online. To view these files please visit the journal online (<http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2016-015087>).

AJMR and BS contributed equally.

Received 10 November 2016
Revised 12 April 2017
Accepted 27 April 2017



CrossMark

For numbered affiliations see end of article.

Correspondence to

Alexandre J M Rambaud;
alexandre.rambaud.kine@gmail.com

ABSTRACT

Introduction The decision regarding when to return to sport after an anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) is an important one. Using a variety of subjective and objective parameters, various attempts have been made to determine an optimal timeline for a return to sport after ACLR, but none have been validated. The aim of the present study is therefore to determine which criteria or combination of criteria could allow to return to sport with the lowest possible risk of reinjury.

Methods and analysis This study is a prospective cohort, single-centre study, with repeated assessments at 6, 9 and 12 months post-ACL surgical reconstruction and including a 3-year follow-up of patients' sporting activity and reinjuries. 275 patients will be included to test explanatory variables. Postural control analysis, knee laxity, questionnaires (International Knee Documentation Committee (IKDC), Tampa Scale of Kinesiophobia-11 (TSK-11), Anterior Cruciate Ligament—Return to Sport After Reinjury (ACL-RSI) and Single Assessment Numeric Evaluation (SANE)), modified Star Excursion Balance Test, running and sprinting biomechanics, Hop Tests and Isokinetic Tests will all be used. The primary outcome will be any reinjury during the follow-up period, defined as a graft rupture, a contralateral ACL rupture or any injury necessitating an interruption of training and requiring a medical consultation. Two groups will be constituted during the follow-up, separating reinjured from non-reinjured patients. In addition, classic analysis and data mining approaches will be used to build predictive models.

Ethics and dissemination The results of this study will be disseminated through peer-reviewed publications and scientific presentations. Ethical approval was obtained through the ethics committee of the University Hospital of Saint-Etienne (reference number IRBN522015/CHUSTE).

INTRODUCTION

Anterior cruciate ligament (ACL) tears represent a public health challenge¹ with

Strengths and limitations of this study

- This is the first study to associate the analysis of several parameters (both habitual and innovative, considered both singly and in combination) with an exploratory data analysis (data mining), to formulate the best decision-making model for determining the optimal time for a return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR).
- This study has been designed to include evaluations at 6, 9 and 12 months post-ACLR in order to include and analyse data from the usual time when athletes return to pivot-sport training (6–9 months) and the time when they can return to competition (generally 9–12 months).
- The study includes only young competitive athletes, which is the population with the highest risk of reinjury and with the highest chance to return to sport at the preinjury level. These findings would not necessarily be applicable to the general population.
- This screening protocol seeks to assess elements involved in the return to sport after ACLR with knee-specific and task-specific objective measurements associated with subjective assessment of knee function and psychometric capabilities.
- The design and objectives of this study will require a significant number of patients, but since this population is highly motivated to return to sport, we are convinced that this choice will limit dropouts.

an incidence reported as 60–71 per 100 000 subjects.^{2,3} ACL tears often give rise to problems like post-traumatic osteoarthritis, which could lead to middle-term and long-term problems for the patient, a potential increase in knee surgery in the future and consequently a significant cost to society. In this context, appropriate treatment of ACL tears

and secondary and tertiary prevention among young pivot-shift athletes represent very relevant challenges and a major orientation for orthopaedics and sports medicine research.¹

After an injury, and especially ACL tear, one of the most frequent questions asked by the patient is: “when can I get back to my sport?”. ACL reconstruction (ACLR) is the current clinical standard⁴ for patients with an ACL tear and considered to be at a high risk of knee instability (young, high-level athletes in a pivoting and/or contact sport). After surgical reconstruction, a rehabilitation programme is set up to allow patients to return to a painless and fully functional daily life.^{5–9} In patients aiming to return to sport (RTS), the rehabilitation programme must continue until this is possible.

To consider an ACLR successful,¹⁰ the patient should be able to return to the same level of sporting activity as before the injury. Moreover, a recent patient satisfaction survey¹¹ confirms that a patient who can resume his sporting activity is more likely to be satisfied with the outcome of the ACLR. However, in their updated review, Ardern *et al*¹² had shown that on average 80% of patients returned to sport, while only 55% returned to competitive levels after ACLR. These mitigated results highlight the fact that the RTS represents an important challenge after ACLR and that current practices should be improved in this aim.

After ACLR, rehabilitation should be optimal to allow athletes RTS and the decision of when RTS is an important one for patient satisfaction and challenging in the context of secondary and tertiary prevention. Indeed, the more the delay in time to RTS, the poorer the patient motivation and their psychological readiness, decreasing as well their chance to RTS at the same level, but on the other hand, an early RTS exposes the patient to a high risk of reinjury.^{13–17} RTS, especially with pivoting or contact sports, exposes the athlete to a risk of reinjury: Wiggins *et al*,¹⁸ in a systematic review and meta-analysis, had found 15% of second ACL reinjury rate, with 7% for the ipsilateral ACL and 8% for the contralateral reinjury rate. Moreover, in the subgroup of younger patient who wanted to RTS, the secondary ACL injury rate was 23%. A new injury after an ACLR could nonetheless be another musculoskeletal injury,¹⁹ as well it could affect the joint (rupture of the graft or contralateral ACL, chondral and/or meniscal lesion). Indeed, a history of an ACLR is a risk factor for developing a repeat hamstring strain,²⁰ hindering RTS and the future practice of sport. Thus, the decision of when RTS is a challenging decision, in order to optimise the chance to RTS at the preinjury level, and in a health protection perspective to minimise the risk of reinjury.

Many factors have been implicated in reinjury risk, including sex,^{7 21 22} age,^{7 23–25} activity level,^{26 27} graft placement,^{28–30} graft type,^{31–35} time from surgery,^{32 34} and deficits in neuromuscular and biomechanical control of the lower limb.³⁶ Considering those risk factors, clinical studies used many techniques and criteria to determine the optimal

moment for a RTS after ACLR.^{13 16 37–39} The most used is the postoperative timeline, either alone or with muscle strength, knee laxity, knee assessment form or functional tests. However, to the best of our knowledge, there are no clearly validated criteria for determining a safe RTS after ACLR. This decision is currently based on multiple criteria^{13 37 38} mostly using the postoperative time frame needed for the biological integration of the graft.^{40 41} It seems, according to a recent publication,¹⁶ that a delayed RTS from 6 months after surgery to 9 months after surgery decreased the risk of reinjury by 51% each month RTS is delayed. However, time criteria alone was not sufficient in determining readiness for a safe RTS; Grindem *et al* thus recommended the uses of both time-based and functional RTS criteria.¹⁶ Barber-Westin and Noyes,¹³ in a systematic review, described how this decision is associated with subjective parameters (‘satisfactory clinical examination’, ‘stable knee’, ‘normal joint function’, self-reported knee function (subjective International Knee Documentation Committee (IKDC)⁴²) and that only 10% of the included studies used objective criteria, such as, muscular strength, knee laxity, the Limb Symmetry Index (LSI) or functional tests (Hop Tests, Star Excursion Balance Test). Kyritsis *et al*³⁹ had also evaluated a set of objective criteria (muscle strength and functional tests) with 158 male professional athletes. Those who did not meet the criteria (quadriceps deficit <10% at 60°/s, LSI for each Hop Tests >90%, running t-test <11 s) had four times greater risk of graft reinjury, and hamstring to quadriceps ratio deficits were associated with an increased risk of ACL rupture. Among the objective criteria, testing isokinetic muscular strength is a clear measure of strength recovery.^{16 39 43 44} and seems to be central in objective assessment of a readiness to RTS.^{16 39} Moreover, contextual factors such as a positive attitude and fear of injury have not been assessed either in these studies or in the literature as predictors of reinjury although it is well known that these factors influence the capacity to RTS, especially at the same level of participation.^{45 46}

In addition, evaluation of lower limb function, close to sport tasks, could also give important information to allow RTS.⁴⁷ Kyritsis *et al*³⁹ have recently associated classical functional tests and ‘running t-test’ to evaluate agility and performance, but analysis of running or sprinting pattern has not been performed. Mazet *et al*⁴⁸ have analysed running patterns in patients with ACLR and reported that biomechanical stiffness, calculated using time of flight and contact time, was significantly greater on the operated limb than on the healthy limb or in healthy patients. Using a non-motorised treadmill fitted with force sensors, Brown and Brughelli⁴⁹ evaluated the sprint of a rugby player after ACLR during the period of RTS (between the return to training and competition). An asymmetry of the ground reaction force (GRF) persisted (horizontal force, 13%; vertical force, 7%) while the isokinetic muscular strength testing result appeared normal. They concluded that an evaluation of sprint mechanics complemented the usual functional assessments. This analysis, in line

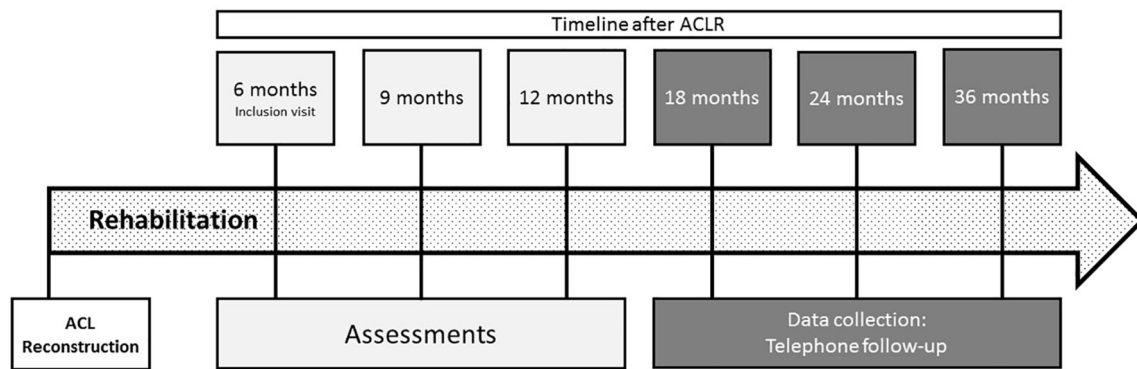


Figure 1 The study design. ACLR, anterior cruciate ligament reconstruction.

with sports reality,⁵⁰ could detect an asymmetry during the RTS phase (6–12 months). This sport-specific assessment seems very relevant to the decision to RTS; indeed, a good gait with efficient biomechanical performance in the sagittal plan is an essential step for a return to pivoting/cutting sports.

In this context, the determination of an association of criteria to help in the decision-making process regarding RTS with the lowest risk of reinjury or associated lesions (muscles or ligaments of the lower limbs) is of major interest in the management of patients with ACLR who want to return to a competitive pivoting sport. Thus, the aim of the present study is therefore to determine which criteria or combination of criteria could allow to RTS with the lowest possible risk of reinjury.

METHODS

The present study is a prospective cohort single-centre study, with repeated measures at 6, 9 and 12 months post-operatively after an ACLR and follow-up of the RTS and reinjury for 3 years after the ACLR. The research started in January 2015 and is due to be completed in December 2020. The study design is shown in [figure 1](#).

Study patients

Potential patients will be drawn consecutively from along the patients of the sports medicine unit or the orthopaedic surgery and traumatology department of the local university hospital. Patients included in the study must meet the criteria for inclusion/exclusion shown in [table 1](#). All study patients will undergo postsurgical rehabilitation in the same physiotherapy clinic using the protocol recommended in the literature^{8 9 51} (for more information about the protocol, please see online supplementary appendix ACL Reconstruction Rehabilitation Protocol).

Assessment procedure

All tests will be performed in the same place, and all patients will be tested at the same time of day between 2 pm and 6 pm. Forty-eight hours before each evaluation session, patients will receive an email reminding them of the test procedure and asking them to complete a subjective questionnaire online (IKDC, Tampa Scale of Kinesiophobia-11 (TSK11), Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport After Reinjury (ACL-RSI) and Single Assessment Numeric Evaluation (SANE)).

Table 1 Inclusion and exclusion criteria for patients

Inclusion criteria	Exclusion criteria
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Participation in pivot and/or contact sports and with intensive sporting activity before the anterior cruciate ligament (ACL) tear: ▶ with a Marx Scale score above 11 before the injury ▶ with a Tegner score above 6 before the injury (competition training with more than three training sessions per week before the injury) ▶ Unilateral tear 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bilateral lower limb pathologies ▶ Recurrence of ACL rupture (with a MRI diagnostic) <ul style="list-style-type: none"> ▶ Contraindications for carrying out a test, that is : <ul style="list-style-type: none"> ▶ Postoperative time less than 6 months ▶ Persistence of knee pain (score >3 at Numeric Pain Rating Scale) ▶ Persistence of a joint effusion (positive patellar tap test) ▶ Incomplete range of motion (range of motion <90% on contralateral side) ▶ Abnormal walk (observable gait deviations during the walk) ▶ Allografts ▶ Skeletal immaturity ▶ Older than 35 years

Informed consent will be obtained from all patients before testing begins and a standardised explanation of the assessment procedure given to the patients. Each test session will include, in the same order, a medical check-up, postural control analysis, knee laxity measurements, a modified Star Excursion Balance Test, biomechanical running and sprint analysis, Hop Tests and Isokinetic Tests, with a 5 min rest between each test. Before the biomechanical analysis begins, patients will warm up with 10 min of cycling to raise muscle temperature. A specific warm up activity will be included before each new activity. The isokinetic evaluation is at the end of the battery to avoid tiredness affecting the results of the other tests.

Evaluation of subjective parameters by questionnaires

The first questionnaire is the IKDC, an algofunctional questionnaire commonly used for ACLR follow-up.^{52 53} An IKDC within the 15th percentile of healthy patients is considered as criteria for a RTS.^{42 54 55} The patient will then complete the TSK11. This questionnaire, containing 11 questions (choice between five answers), is used to estimate a patient's fear of movement and reinjury giving a score from 11 to 55.^{56–58} A score below 20 indicates low pain avoidance and could also allow a RTS.⁵⁹ The last questionnaire the patient is asked to complete is the ACL-RSI. This 12-item scale measures three specific psychological constructs—emotions, confidence in performance and risk appraisal—on a scale from 0 to 100. This scale is a predictive parameter for a successful RTS after ACLR.⁵⁵

The patient will also be asked to estimate his knee recovery on a scale (from 0 to 100) with a SANE.^{53 60}

Medical check-up

First, we will check if the online questionnaires have been done, and the presence of inclusion criteria and absence of exclusion criteria. The assessor will fill out the demographic information in the observation book (sex, age, weight, height, sport, training frequency and Marx's score before the ACL tear), a timeline for a return to running, sport-specific training and competitive play where possible, and finally, the ACLR surgeon and technique used. The clinical examination will follow the IKDC-2000 grid.⁵²

Postural control analysis

A WinPosturo (Medicaptureurs, Balma, France) stabilometry platform will be used with the WinPosturo software (Medicaptureurs, Balma, France) to determine variations in the centre of pressure (CoP). The force plate, which measures 530×460×35 mm has three pressure gauges (hysteresis <0.2%), with a sensitivity of 90 points per Newton. The sampling frequency will be fixed at 40 Hz with the platform recalibrated before each session. The assessment will be conducted in an isolated room, in a noise-free environment, with a hard, flat floor, following the recommendations of the American Academy of Neurology⁶¹ and the study of Ruhe *et al.*⁶² The standardised position of the feet will be oriented 15° laterally

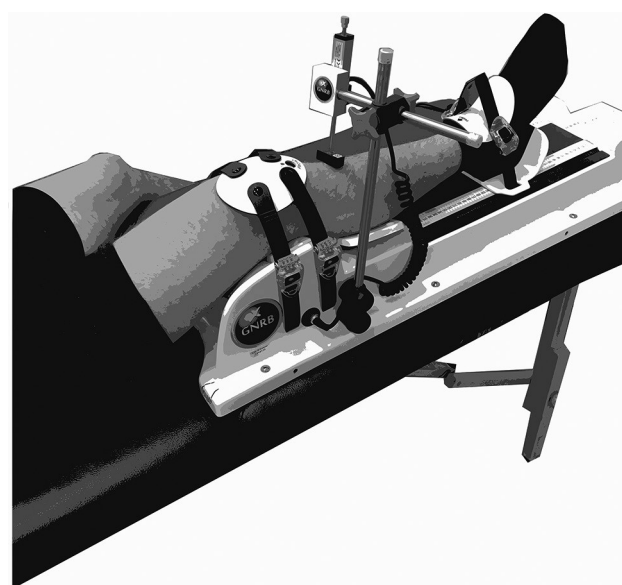


Figure 2 Knee laxity measurement position and the GNRB system.

to the sagittal plane. The patient will have to breathe normally and stare at a point 1.5 m in front him, at eye level, the arms relaxed along the body. The patient will be in sportswear and socks.

Four measurements, knees in extension, separated by 30 s of recovery in a sitting position, will be performed:

- ▶ Bipedal position, eyes open (60 s)
- ▶ Bipedal position, eyes closed (60 s)
- ▶ Single-leg squat followed by balancing on the healthy leg (30 s), eyes open¹⁷
- ▶ Single-leg squat followed by balancing on the operated leg, eyes open (30 s)¹⁷

The values of total CoP path (CoP in mm), CoP velocity (in mm/s), SD of CoP (SDx and SDy) and CoP sway area (in mm²) will be recorded. Kouveliotti *et al* showed good or excellent reproducibility of all these variables using a similar assessment protocol (intraclass correlation coefficient (ICC) range from 0.68 to 0.91).⁶³

Knee laxity measurements

The GNRB system (Genourob, Laval, France) is a non-invasive arthrometer that provides comparative bilateral measurements of knee laxity. This system is reliable and reproducible (ICC range from 0.77 to 0.91).^{64–66} The patient will lie on a standard examination table in the supine position, with the knee at 20° flexion and 0° of rotation (figure 2). The lower limb is immobilised in a thermoformed shell, adaptable for different leg lengths, at the patella and the foot with a force of about 65±5 N controlled by a force sensor with a precision of 0.1 mm. The analysis will begin with the healthy leg, with a push to 134 N and three pushes to 250 N. The same procedure is then repeated on the operated limb. The displacement of the anterior tibial tubercle relative to the femur is measured. The drawer shift/pressure curve is determined by the displacement (with 0.1 mm precision) and



the slope of the curve (Slp in degree) which defines ligamentous laxity. The push to 250N with the largest displacement (D_{ap} in mm) and Slp will be retained. The difference between the operated and healthy limb will be calculated for D_{ap} and Slp.

Modified Star Excursion Balance Test

The patient, shoeless, will be asked to stand on one leg, starting with the healthy limb, without lifting the heel and with hands on hips and perform the following exercise as described in the literature^{67–69}: to reach maximally to touch a point as far as possible in three directions, along (1) an anteroposterior axis (2) the posterolateral axis and, finally, (3) the posteromedial axis, returning to the initial position between each movement. Two attempts and two measurements will be made for each direction. The longest distance (in cm) will be noted for each direction. The reliability is high with ICC from 0.83 to 0.96.⁷⁰

Running and sprinting mechanics

Patients will choose either a cycle ergometer and/or jogging for a 10–15 general warm-up, followed by a specific sprint warm-up including sprint drills and short sprints. On a motorised instrumented treadmill (ADAL3D-WR; Medical Development, HEF Tecmachine, Andrezieux-Boutheon, France), with four piezoelectric force transducers (KI 9077b, Kistler, Winterthur, Switzerland), on a hard, flat surface in a quiet room, the patient will then undergo the biomechanical evaluations first for running and then sprinting with a 1 min rest between them (figure 3). The reliability is high with ICC from 0.85 to 0.90.⁷¹

For the running biomechanical evaluation, each patient will run for 3 min at 3.33 m/s (12 km/h) and, without the patient being informed of the exact moment of data recording, 20 s of biomechanical parameters will be recorded. Mechanical data will be sampled at 1000 Hz. After appropriate filtering (Butterworth-type 30 Hz low-pass filter, second order), instantaneous data of vertical force will be averaged for each support phase (vertical force above 30 N) over the 20 s (FV_R) and expressed in Newtons (N) and body weight (BW). For each step, contact (t_c) and aerial (t_a) times will be calculated. Spring–mass parameters, like vertical stiffness

(k_{vert} in kN/m) and leg stiffness (k_{leg} in kN/m), will be calculated using the computation method proposed by Morin *et al.*⁷² The lower limb leg length will be the distance behind the great trochanter to ground distance in a standing position. The stride length (l_{stride} in m) will be calculated as: $l_{stride} = (t_c + t_a) \cdot v$.

For the sprint running biomechanical evaluation, each patient will first be familiarised with sprinting on a treadmill by three 6 s sprints separated by 1 min of rest. The patient is fitted with a leather weightlifting belt attached via a rigid tether (0.6 cm in diameter) to the wall (figure 3), as described by Morin *et al.*⁷² The constant motor torque will be set to 160% of the default torque, ie, the motor torque necessary to overcome the friction on the treadmill belt due to the participant's BW. The default torque will be measured by making the participants stand still and by increasing the driving torque until a movement of the treadmill belt greater than 2 cm is observed over 5 s. Motor torque of 160% of the default value will be selected after several preliminary measurements comparing various torques, as this will allow participants to sprint in a comfortable manner and produce maximal effort without risking a loss of balance. Once the patient is correctly attached, he will be required to lean forward in a typical crouched sprint-start position with their preferred foot forward. This starting position will be used and standardised throughout the sprint series. After a 3 s countdown, the treadmill will be released, and the treadmill belt will begin to accelerate as participants apply a positive horizontal force. With patients strongly encouraged to produce their maximum intensity, two sprints will be recorded separated by a 1 min rest period. The data used for analysis will be: instantaneous data of vertical, net horizontal and total GRF averaged for each support phase (vertical force above 30 N) over 6 s sprints (FV_{sprint} , FH_{sprint} , $F_{tot\ sprint}$, respectively), and expressed in Newtons (N) and BW. For each step, the ratio of forces applied on the ground (RF) will be calculated as the ratio of FH_{sprint} to $F_{tot\ sprint}$ for one contact as follows: $RF = FH_{sprint} / F_{tot\ sprint}$ (expressed in %).⁷³ Then, mean and maximal values of ratio forces for the 6 s sprint will be computed (RF-mean and RF-max, respectively). The index of force application technique (D_{RF}) representing the decrement in RF with increasing speed (S) will be computed as the slope of the linear RF-speed relationship calculated from the step-averaged values between the second step and the step at top speed.⁵⁰ Therefore, the higher the DRF (ie, a flat RF-speed relationship), the more RF will be maintained despite increasing velocity, and vice versa.⁷⁴ Lastly, for each 6 s sprint, performance will be described through mean and maximal running speeds (S and S-max, respectively).

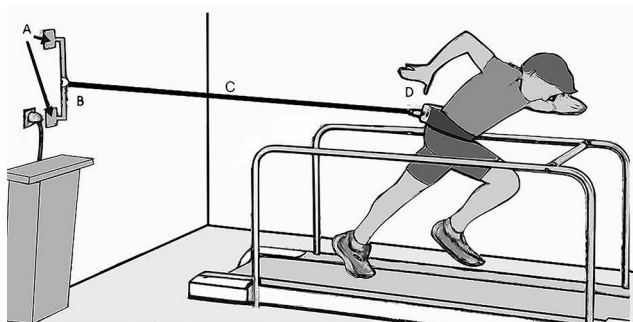


Figure 3 A runner fitted with a leather weightlifting belt (D) attached with a rigid tether (C) to the wall-mounting bracket (A and B) sprinting on a motorised treadmill.

Hop Tests

The patient will be asked to perform the following exercises, as described by Noyes *et al.*⁷⁵ (figure 4):

- ▶ Single One-Leg Hop Test on the healthy limb and then the operated limb, with the arms crossed, hands

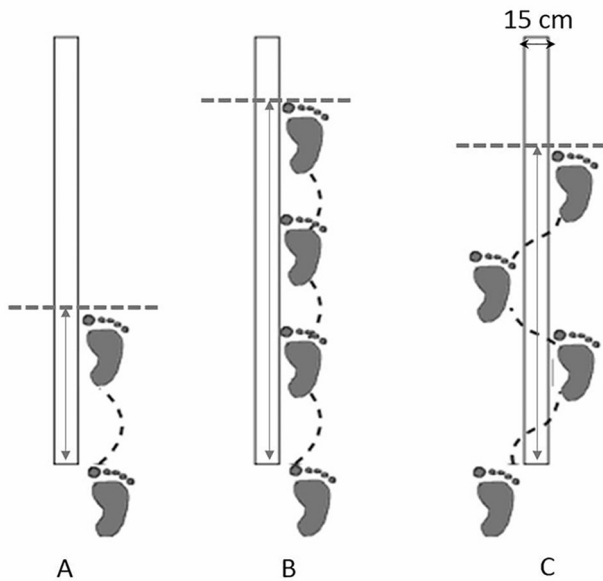


Figure 4 Hop Tests. (A) Single One-Leg Hop Test, (B) Triple One-Leg Hop Test and (C) Cross-over One-Leg Hop Test.

on shoulders. The patient will perform one hop, as far as possible, with a controlled, balanced landing (minimum 3s). If the patient cannot maintain the landing position, makes extra hops, or does not keep his hands on his shoulders, then the Hop Test will be considered a failure.

- ▶ Triple One-Leg Hop Test on the healthy limb and then the operated limb with the arms in any position. The patient will perform three consecutive hops as far as possible. The last hop position must be maintained for a minimum of 3s as with the Single One-Leg Hop Test.
- ▶ Cross-over One-Leg Hop Test on the healthy limb and then the operated limb with the arms in any position. The test is carried out on a 6.5 m strip of carpet with a central line 15 cm in width. The patient is asked to make three hops, the first laterally, crossing the line on each hop. Landing after the final hop must be as with the Single One-Leg Hop Test. The Cross-over One-Leg Hop Test allows assessment of the cutting

movement capabilities of the patient.⁷⁵ It imposes both predominant sagittal plane and rotation forces on the frontal plane of the knee. In addition, the test highlights any instability in the knee and tests muscle extensibility, muscle strength and power, proprioception, neuromuscular control, dynamic balance and agility.⁷⁶

Patients start from single limb stance. Every attempt will include at least three jumps and will continue until the patient progresses. The best distance for each leg and each Hop Test will be recorded for analysis (in cm). In case of failure, the patient will have the opportunity to do the Hop Test again until it will be considered valid. The reliability is high with ICC from 0.84 to 0.92.⁷⁷

Isokinetic assessment

As the resulting tiredness could affect the other tests if done earlier in the battery, the isokinetic quadriceps and hamstring muscle strength assessment will be performed last. They will be done on a Con-Trex Multi-Joint dynamometer (CMV AG, Dübendorf, Switzerland) and controlled by Con-Trex Software. The installation is described elsewhere in the literature.^{78 79} The participants will be seated with the hip joint at about 85° and strapped in place at the chest, pelvis and mid-thigh to avoid postural compensation during the assessment. The contralateral limb will be fixed to a support at the ankle. The axis of the dynamometer will be perfectly aligned with the rotation axis (lateral femoral epicondyle) of the knee joint. Resistive support will be strapped to the leg, at 2–3 cm proximal to the ankle joint line. The range of knee motion will be set from 80° for a safe, comfortable, comparative assessment of quadriceps (extensor) and hamstring (flexors) muscles. The gravity correction will be used. Assessment will begin with the healthy knee, and then the operated knee, and each series of repetitions will be followed by 1 min of rest. The assessment is summarised in [table 2](#).

The isokinetic assessment will be performed in this order, using gravity corrections, at a range of motion of 5°–85°, and measuring peak torque for each test session. A 1 min rest will be allowed between each session.

Table 2 Isokinetic assessment design

		Repetitions	Angular velocity and mode of contraction
First specific warm-up	↓	Six submaximal	120°/s in concentric
Second specific warm-up	↓	Six submaximal	120°/s in concentric
Habituation session	↓	Three submaximal	60°/s in concentric
Maximal test session with encouragement	↓	Three maximal	60°/s in concentric
Maximal test session with encouragement	↓	Three maximal	120°/s in concentric
Habituation session	↓	Three submaximal	30°/s in eccentric
Maximal test session with encouragement	↓	Three maximal	30°/s in eccentric



Torque, position and angular velocity data will be recorded from the isokinetic dynamometer with a sampling rate of 100 Hz. After appropriate filtering, for concentric and eccentric strength trials, the software will calculate a large number of parameters, but we will retain only the absolute peak torque, the most reproducible parameter (ICC >0.96).⁷⁸

The peak torque value normalised to the BW (Nm/kg) will be recorded for each mode and speed of contraction for the quadriceps (Q) and hamstring (H). The Q/H ratio will be calculated for each mode and speed of contraction on the operated side, with a ratio $\geq 60\%$ considered to be physiologically sufficient to obtain joint control. A mixed functional ratio, associating the eccentric performance of the flexor (at 30°/s) and the concentric performance of the extensor (at 240°/s) will also be calculated, as reported by Croisier *et al.*⁷⁹

Follow-up after ACL surgical reconstruction

Patient follow-up will continue until 36 months postoperatively. After the evaluation at 12 months postsurgery, patient follow-up will continue for a further 2 years. The researchers will attempt to follow-up all patients by phone interview every 6 months to determine the date of return to running, to pivoting sport-specific training and to pivoting sport competition, as well as the date and the nature of any reinjury that may occur. The reinjury is defined as rupture of the transplant, or the contralateral ACL, or any injury requiring the sporting activity to cease and necessitating a consultation and/or medical care. We will also collect the Tegner score at 3 years post-ACLR.

The decision for clearance to a RTS will be made by a sport physician, blinded to all the tests results except the isokinetics results. This decision will be taken after considering the time from surgery, clinical experience and the isokinetics results.

Primary outcome

The main criterion for assessment is the occurrence of reinjury during the 3-year follow-up. A reinjury is defined as a rupture of the transplant or the contralateral ACL or any injury requiring the sporting activity to cease and necessitating a consultation and/or medical care.

Method of accounting for missing, unused or invalid data

A patient's participation in the study will cease if significant complications appear when performing the tests and all data collected before that point will be analysed.

Power and sample size considerations

Based on the rate of ACL reinjury (rupture of the transplant or the contralateral ACL)¹⁸ described in the literature for the subgroup of younger athletes who RTS, and considering the unknown rate of other possible injuries (any injury requiring the sporting activity to cease and necessitating a consultation and/or medical care) after an ACLR, a global rate of reinjury after ACLR could be assumed at 20%. Considering a 10% dropout rate, and that 10 cases (reinjury) are needed to test one explanatory

variable, it is necessary to include 50 patients to test one explanatory variable for 95% power and a type-I error rate (alpha) of 0.05. Depending on the results of the data mining procedures (principal components analysis and hierarchical clustering on principal components) on the variables presented in [table 3](#), we will choose a maximum of five variables to construct the model. We will therefore need to include 275 patients.

Statistical analyses

Exploratory data analysis will be performed, following five steps adapted from data mining processes^{80 81}: (1) identification of study objectives, (2) data acquisition, (3) data evaluation and preparation, (4) data analysis and modelling and (5) results, interpretation and validation.

In step 3, we will analyse the data quality checking that there are no inconsistencies, errors, duplicates or 'aberrant' data. We will also verify the overall consistency of the data.

In step 4, classification and selection of variables reported in [table 3](#) will define the explanatory variables required to build the models (with principal components analysis then hierarchical clustering on principal components). We will choose the best data analysis taking into account the characteristic of the model variables.

Lastly, in step 5, the model(s) will be analysed and compared in order to define as precisely as possible the explanatory variables and the most suitable model. The p value will be adjusted if necessary and other methods could be used (Akaike information criterion or Bayesian information criterion). The parameters of the model will then be analysed in order to define their clinical relevance.

The use of this exploratory data analysis will be based on by some of the work in medical research to use data mining.^{80 82} However, this method does not exclude the classical statistical analyses for the creation of a model. Lastly, depending on our variables, we will use the appropriate statistical tests. After performing a correlation matrix and calculating collinearity using linear regression, we will calculate several generalised linear models if possible: linear regression, generalised estimating equations and generalised linear mixed model, depending on the characteristics of our variables.

Statistical analyses will be performed using R (<http://www.R-project.org>).

ETHICS AND DISSEMINATION

The present study has been approved by the local ethical committee (IRBN522015/CHUSTE) and will be recorded on ClinicalTrials.gov. Prior to enrolment in the study, all patients will be asked to give their informed consent. The patient can decide at any time to be released from the study, and they will be informed of this in the information leaflet. His/her data will then be deleted from the data collection file. Leaving the study will have no incidence on the normal monitoring protocol of patients postsurgery.

**Table 3** Explanatory variables

Categories of criteria	Explanatory variables	Unit or range	Calculated data
Self-reported measures	Marx preinjury	0–16	
	Tegner preinjury	0–10	
	IKDC	0–100	
	TSK11	11–55	
	SANE	0–100	
Postural control analysis	Centre of pressure (CoP)	mm	
	CoP velocity	mm/s	
	CoP area	mm ²	
Knee laxity measurements	GnRB slope	mm	
	GnRB anteroposterior displacement	mm	
SEBT	Anterior distance	m	
	Posterolateral distance	m	
	Posterolateral distance	m	
	Composite SEBT score	%	X
Running and sprinting mechanics	LSI Leg stiffness	%	X
	LSI stride length	%	X
	LSI sprint vertical force	%	X
	LSI sprint horizontal force	%	X
	LSI sprint total force	%	X
	LSI sprint ratio of forces	%	X
	LSI sprint DRF	%	X
Hop Tests	LSI Single One-Leg Hop Test	%	X
	LSI Triple One-Leg Hop Test	%	X
	LSI Cross-over One-Leg Hop Test	%	X
Isokinetic assessment	Quadriceps peak torque at 60°/s BW	N/kg	
	Quadriceps peak torque at 240°/s BW	N/kg	
	Quadriceps peak torque at 30°/s BW	N/kg	
	Hamstring peak torque at 60°/s BW	N/kg	
	Hamstring peak torque at 240°/s BW	N/kg	
	Hamstring peak torque at 30°/s BW	N/kg	
	Mixed functional ratio	%	X
Follow-up	Marx 3 years postop	0–16	
	Tegner 3 years postop	0–10	
	SANE 3 years postop	0–100	

LSI=operated leg/healthy leg; Mixed functional ratio=IJ30/Q240 (with IJ30 the Hamstring peak torque at 30°/s of isokinetic assessment, and Q240 the Quadriceps peak torque at 240°/s of isokinetic assessment).

BW, body weight; IKDC, International Knee Documentation Committee; LSI, Limb Symmetry Index; postop, postoperative; SANE, Single Assessment Numeric Evaluation; SEBT, Star Excursion Balance Test; TSK11, Tampa Scale of Kinesiophobia-11.

The results of this study will be disseminated via presentation at local, national and international conferences and peer-reviewed journals.

Author affiliations

¹Inter-university Laboratory of Human Movement Biology (LIBM EA 7424), University of Lyon, University Jean Monnet, Saint-Etienne, France

²Physiotherapy Clinic of the Sport Center, La Talaudière, France

³Department of Orthopaedic and Trauma Surgery, University Hospital Center of Saint-Etienne, Hôpital Nord, Saint-Etienne, France

⁴Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité (LIBM), EA 7424, F-73000 Chambéry, France

⁵Université Côte d'Azur, LAMHESS, Nice, France

⁶Department of Clinical and Exercise Physiology, Sports Medicine Unit, University Hospital of Saint-Etienne, Faculty of Medicine, Saint-Etienne, France

Acknowledgements The authors are grateful to the study participants, hospital staff and study staff and, especially, Léa Feuillassier, Alex Pavoine, Antoine Dany and Stéphane Moret.



Contributors AJMR, BS and PE designed the CR'STAL study and contributed to development of the study protocol. AJMR and BS drafted the manuscript, BS submitted to ethic committee. AJMR, BS, RT, PS, JBM, RP and PE assisted in drafting the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial or not-for-profit sectors.

Competing interests None declared.

Patient consent Obtained.

Ethics approval Ethical approval was obtained through the University Hospital of Saint-Etienne Ethics Committee (reference number IRBN522015/CHUSTE).

Provenance and peer review Not commissioned; externally peer reviewed.

Open Access This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

© Article author(s) (or their employer(s) unless otherwise stated in the text of the article) 2017. All rights reserved. No commercial use is permitted unless otherwise expressly granted.

REFERENCES

1. Wilk KE. Anterior cruciate ligament injury prevention and rehabilitation: let's get it right. *J Orthop Sports Phys Ther* 2015;45:729–30.
2. Parkkari J, Pasanen K, Mattila VM, *et al*. The risk for a cruciate ligament injury of the knee in adolescents and young adults: a population-based cohort study of 46 500 people with a 9 year follow-up. *Br J Sports Med* 2008;42:422–6.
3. Nordenvall R, Bahmanyar S, Adami J, *et al*. A population-based nationwide study of cruciate ligament injury in Sweden, 2001–2009: incidence, treatment, and sex differences. *Am J Sports Med* 2012;40:1808–13.
4. Shea KG, Carey JL, Richmond J, *et al*. The American Academy of Orthopaedic Surgeons evidence-based guideline on management of anterior cruciate ligament injuries. *J Bone Joint Surg Am* 2015;97:672–4.
5. Kvist J. Rehabilitation following anterior cruciate ligament injury: current recommendations for sports participation. *Sports Med* 2004;34:269–80.
6. Paulos L, Noyes FR, Grood E, *et al*. Knee rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction and repair. *Am J Sports Med* 1981;9:140–9.
7. Shelbourne KD, Gray T, Haro M. Incidence of subsequent injury to either knee within 5 years after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft. *Am J Sports Med* 2009;37:246–51.
8. Kruse LM, Gray B, Wright RW. Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:1737–48.
9. van Melick N, van Cingel RE, Brooijmans F, *et al*. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med* 2016;50:1506–15.
10. Lynch AD, Logerstedt DS, Grindem H, *et al*. Consensus criteria for defining 'successful outcome' after ACL injury and reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort investigation. *Br J Sports Med* 2015;49:335–42.
11. Ardern CL, Österberg A, Sonesson S, *et al*. Satisfaction with knee function after Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction is Associated with Self-Efficacy, Quality of Life, and returning to the Preinjury Physical Activity. *Arthroscopy* 2016;32:1631–8.
12. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, *et al*. 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. *Br J Sports Med* 2014;48:1543–52.
13. Barber-Westin SD, Noyes FR. Objective criteria for return to athletics after anterior cruciate ligament reconstruction and subsequent reinjury rates: a systematic review. *Phys Sportsmed* 2011;39:100–10.
14. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, *et al*. Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to Sport. *Am J Sports Med* 2014;42:1567–73.
15. Ardern CL. Anterior cruciate ligament reconstruction—not exactly a one-way ticket back to the preinjury level: a review of contextual factors affecting return to sport after surgery. *Sports Health* 2015;7:224–30.
16. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, *et al*. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2016;50:804–8.
17. Culvenor AG, Alexander BC, Clark RA, *et al*. Dynamic single-leg postural control is impaired bilaterally following anterior cruciate ligament reconstruction: implications for reinjury risk. *J Orthop Sports Phys Ther* 2016;46:357–64.
18. Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, *et al*. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med* 2016;44:1861–76.
19. de Visser HM, Reijman M, Heijboer MP, *et al*. Risk factors of recurrent hamstring injuries: a systematic review. *Br J Sports Med* 2012;46:124–30.
20. Koulouris G, Connell DA, Brukner P, *et al*. Magnetic resonance imaging parameters for assessing risk of recurrent hamstring injuries in elite athletes. *Am J Sports Med* 2007;35:1500–6.
21. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, *et al*. Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clin J Sport Med* 2012;22:116–21.
22. Allen MM, Pareek A, Krych AJ, *et al*. Are female soccer players at an increased risk of second anterior cruciate ligament injury compared with their athletic peers? *Am J Sports Med* 2016;44:2492–8.
23. Kamien PM, Hydrick JM, Replogle WH, *et al*. Age, graft size, and Tegner activity level as predictors of failure in anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft. *Am J Sports Med* 2013;41:1808–12.
24. Magnussen RA, Lawrence JT, West RL, *et al*. Graft size and patient age are predictors of early revision after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft. *Arthroscopy* 2012;28:526–31.
25. Webster KE, Feller JA, Leigh WB, *et al*. Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2014;42:641–7.
26. Borchers JR, Pedroza A, Kaeding C. Activity level and graft type as risk factors for anterior cruciate ligament graft failure: a case-control study. *Am J Sports Med* 2009;37:2362–7.
27. Salmon L, Russell V, Musgrove T, *et al*. Incidence and risk factors for graft rupture and contralateral rupture after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2005;21:948–57.
28. Brophy RH, Selby RM, Altchek DW. Anterior cruciate ligament revision: double-bundle augmentation of primary vertical graft. *Arthroscopy* 2006;22:683.e1–683.e5.
29. Marchant BG, Noyes FR, Barber-Westin SD, *et al*. Prevalence of nonanatomical graft placement in a series of failed anterior cruciate ligament reconstructions. *Am J Sports Med* 2010;38:1987–96.
30. Hui C, Salmon LJ, Kok A, *et al*. Fifteen-year outcome of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft for "isolated" anterior cruciate ligament tear. *Am J Sports Med* 2011;39:89–98.
31. Gifstad T, Foss OA, Engebretsen L, *et al*. Lower risk of revision with patellar tendon autografts compared with hamstring autografts: a registry study based on 45,998 primary ACL reconstructions in Scandinavia. *Am J Sports Med* 2014;42:2319–28.
32. Laboute E, Savalli L, Puig P, *et al*. Analysis of return to competition and repeat rupture for 298 anterior cruciate ligament reconstructions with patellar or hamstring tendon autograft in sportspeople. *Ann Phys Rehabil Med* 2010;53:598–614.
33. Leys T, Salmon L, Waller A, *et al*. Clinical results and risk factors for reinjury 15 years after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective study of hamstring and patellar tendon grafts. *Am J Sports Med* 2012;40:595–605.
34. Maletis GB, Inacio MC, Desmond JL, *et al*. Reconstruction of the anterior cruciate ligament: association of graft choice with increased risk of early revision. *Bone Joint J* 2013;95-B:623–8.
35. Persson A, Fjeldsgaard K, Gjertsen JE, *et al*. Increased risk of revision with hamstring tendon grafts compared with patellar tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction: a study of 12,643 patients from the Norwegian Cruciate Ligament Registry, 2004–2012. *Am J Sports Med* 2014;42:285–91.
36. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, *et al*. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med* 2010;38:1968–78.

37. Czuppon S, Racette BA, Klein SE, *et al*. Variables associated with return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *Br J Sports Med* 2014;48:356–64.
38. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, *et al*. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med* 2011;45:596–606.
39. Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, *et al*. 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. *Br J Sports Med* 2016;50:946–51.
40. Claes S, Verdonk P, Forsyth R, *et al*. The "ligamentization" process in anterior cruciate ligament reconstruction: what happens to the human graft? A systematic review of the literature. *Am J Sports Med* 2011;39:2476–83.
41. Kawamura S, Ying L, Kim HJ, *et al*. Macrophages accumulate in the early phase of tendon-bone healing. *J Orthop Res* 2005;23:1425–32.
42. Anderson AF, Irgang JJ, Kocher MS, *et al*. The International Knee Documentation Committee subjective knee evaluation form: normative data. *Am J Sports Med* 2006;34:128–35.
43. Undheim MB, Cosgrave C, King E, *et al*. 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. *Br J Sports Med* 2015;49:1305–10.
44. Pua Y-H, Bryant AL, Steele JR, *et al*. Isokinetic dynamometry in anterior cruciate ligament injury and reconstruction. *Annals Academy of Medicine Singapore* 2008;37:330.
45. Langford JL, Webster KE, Feller JA. A prospective longitudinal study to assess psychological changes following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Br J Sports Med* 2009;43:377–8.
46. Lai CC, Ardern CL, Feller JA, *et al*. Eighty-three per cent of elite Athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br J Sports Med* 2017;bjsports-2016-096836 (Published Online First: 21 February 2017).
47. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, *et al*. 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical therapy, Bern. *Br J Sports Med* 2016;50:853–64.
48. Mazet A, Morin JB, Semay B, *et al*. Changes in running mechanical pattern after an anterior cruciate ligament plasty. *Science & Sports* 2016;31:219–22.
49. Brown SR, Brughelli M. Determining return-to-sport status with a multi-component assessment strategy: a case study in rugby. *Phys Ther Sport* 2014;15:211–5.
50. Morin JB, Sève P. Sprint running performance: comparison between treadmill and field conditions. *Eur J Appl Physiol* 2011;111:1695–703.
51. Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 1990;18:292–9.
52. Hefti F, Müller W, Jakob RP, *et al*. Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1993;1:226–34.
53. Shelbourne KD, Barnes AF, Gray T. Correlation of a single assessment numeric evaluation (SANE) rating with modified Cincinnati knee rating system and IKDC subjective total scores for patients after ACL reconstruction or knee arthroscopy. *Am J Sports Med* 2012;40:2487–91.
54. Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, *et al*. Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;25.
55. Løgerstedt D, Di Stasi S, Grindem H, *et al*. Self-reported knee function can identify athletes who fail return-to-activity criteria up to 1 year after anterior cruciate ligament reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort study. *J Orthop Sports Phys Ther* 2014;44:914–23.
56. Hapidou EG, O'Brien MA, Pierrynowski MR, *et al*. Fear and avoidance of movement in people with chronic pain: psychometric properties of the 11-Item Tampa Scale for Kinesiophobia (TSK-11). *Physiother Can* 2012;64:235–41.
57. Tkachuk GA, Harris CA. Psychometric properties of the Tampa Scale for Kinesiophobia-11 (TSK-11). *J Pain* 2012;13:970–7.
58. Woby SR, Roach NK, Urmston M, *et al*. Psychometric properties of the TSK-11: a shortened version of the Tampa Scale for Kinesiophobia. *Pain* 2005;117:137–44.
59. Lentz TA, Zeppieri G, Tillman SM, *et al*. Return to preinjury sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: contributions of demographic, knee impairment, and self-report measures. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:893–901.
60. Winterstein AP, McGuine TA, Carr KE, *et al*. Comparison of IKDC and SANE outcome measures following knee injury in active female patients. *Sports Health* 2013;5:523–9.
61. American Academy of Neurology. Assessment: posturography. Report of the Therapeutics and technology assessment subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology* 1993;43:1261.
62. Ruhe A, Fejer R, Walker B. The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions—a systematic review of the literature. *Gait Posture* 2010;32:436–45.
63. Kouvelioti V, Kellis E, Kofotolis N, *et al*. Reliability of Single-leg and Double-leg balance tests in subjects with Anterior Cruciate Ligament reconstruction and Controls. *Res Sports Med* 2015;23:151–66.
64. Vauhnik R, Morrissey MC, Perme MP, *et al*. Inter-rater reliability of the GNRB® knee arthrometer. *Knee* 2014;21:541–3.
65. Robert H, Nouveau S, Gageot S, *et al*. A new knee arthrometer, the GNRB: experience in ACL complete and partial tears. *Orthop Traumatol Surg Res* 2009;95:171–6.
66. Collette M, Courville J, Forton M, *et al*. Objective evaluation of anterior knee laxity; comparison of the KT-1000 and GNRB® arthrometers. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:2233–8.
67. Kinzey SJ, Armstrong CW. The reliability of the star-excursion test in assessing dynamic balance. *J Orthop Sports Phys Ther* 1998;27:356–60.
68. Herrington L, Hatcher J, Hatcher A, *et al*. A comparison of Star Excursion Balance Test reach distances between ACL deficient patients and asymptomatic controls. *Knee* 2009;16:149–52.
69. Gribble PA, Hertel J, Plisky P. Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review. *J Athl Train* 2012;47:339–57.
70. Hyong IH, Kim JH. Test of intrarater and interrater reliability for the star excursion balance test. *J Phys Ther Sci* 2014;26:1139–41.
71. Morin JB, Samozino P, Bonnefoy R, *et al*. Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *J Biomech* 2010;43:1970–5.
72. Morin JB, Dalleau G, Kyröläinen H, *et al*. A simple method for measuring stiffness during running. *J Appl Biomech* 2005;21:167–80.
73. Morin JB, Edouard P, Samozino P. Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43:1680–8.
74. Morin JB, Bourdin M, Edouard P, *et al*. Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur J Appl Physiol* 2012;112:3921–30.
75. Noyes FR, Barber SD, Mangine RE. Abnormal lower limb symmetry determined by function hop tests after anterior cruciate ligament rupture. *Am J Sports Med* 1991;19:513–8.
76. Clark NC. Functional performance testing following knee ligament injury. *Physical Therapy in Sport* 2001;2:91–105.
77. Reid A, Birmingham TB, Stratford PW, *et al*. Hop testing provides a reliable and valid outcome measure during rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther* 2007;87:337–49.
78. Maffiuletti NA, Bizzini M, Desbrosses K, *et al*. Reliability of knee extension and flexion measurements using the Con-Trex isokinetic dynamometer. *Clin Physiol Funct Imaging* 2007;27:346–53.
79. Croisier JL, Ganteaume S, Binet J, *et al*. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *Am J Sports Med* 2008;36:1469–75.
80. Esfandiari N, Babavalian MR, Moghadam A-ME, *et al*. Knowledge discovery in medicine: current issue and future trend. *Expert Syst Appl* 2014;41:4434–63.
81. Witten IH, Frank E, Hall MA. *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. Third Edition. Burlington: Morgan Kaufmann, 2011.
82. Combes C, Azema J. Clustering using principal component analysis applied to autonomy–disability of elderly people. *Decis Support Syst* 2013;55:578–86.

Phase 1

Acute Management/Early Motion and Basic Movement Retraining

This phase begins immediately after surgery and continues for 3 weeks.

Goals

1. Achieve full active knee extension equal to the uninvolved side with active Vaste Medialis recruitment.
2. Eliminate swelling
3. Restore the ability to control the leg while weight bearing
4. Achieve at least 90° of knee flexion
5. Be able to do straight leg raise.
6. Normalize walking pattern with the assistance of crutches and/or brace

If hamstring graft, no active hamstring exercises until 2 weeks and no open-chain resisted hamstring curls until 4 weeks post-op.

Type of exercises:

- Range of Motion (ROM) Exercises
- Soft tissue treatments to patella, patella tendon, incisions, and posterior musculature to improve range of motion and decrease fibrosis.
- Muscle Activation with quad sets, straight leg raises and double leg mini squats
- Core Body Training
- Ambulation like diagonal weight shifting, backward stepping and step-overs

Phase 2

Basic Strength and Proprioception

This phase begins 3 weeks after surgery. It will usually take 3-5 weeks to achieve the goals in this phase.

Goals

1. Restore proper body alignment and control with basic movements, such as walking without assistance, squats, stationary lunges and single-leg balance
2. Build lower extremity and core body strength
3. Develop increased proprioception, starting with stationary postures and then progressing to movements
4. Achieve active range of motion equal to the uninvolved Knee

Type of exercises:

- Range of Motion (ROM) and stationary bike
- Soft tissue treatments
- Gait Drills
- Functional Strengthening (add weight or resistance with exercises), Single-leg/unilateral workouts (i.e. on weight machines, squats, side and forward step-downs).
- increase depth of balance exercises
- Core Body and increase intensity with aerobic machines.

Carefully monitor exercises for signs of diminished eccentric control, weakness, or poor ability to stabilize against varus / valgus moment with loading exercises.

Phase 3

Dynamic Neuromotor Strength, Endurance and Coordination

This phase can be initiated when the goals of phase 2 are met. On average this will begin 8 weeks after surgery.

Goals

1. Increase the strength of the involved leg.
2. Develop eccentric neuromuscular control to allow acceptance of impact activities without increasing symptoms
3. Develop dynamic flexibility to allow for proper alignment during activities of increasing speed.
4. Full range of motion is expected

Type of exercises:

-Range of Motion

-Dynamic Agility Drills: begin with small strides at low velocity, gradually progressing the velocity.

-Functional Strengthening. The recommended strengthening exercises are closed chain: squat, lunge.

-Landing and Takeoff Drills: before initiating impact activities the patient should not have any swelling, have full knee extension, be able to balance on one leg for 10 seconds and be able to perform a single leg squat to approximately 45-60° of knee flexion with good posture and control.

- Balance exercises with challenge postural control and duration: balance board activities, swim strokes, single leg balance with your eyes closed

-Core Body and cardiovascular conditioning

Phase 4

Athletic Enhancement and Return to Activity

This phase can be initiated when the goals of Phase 3 are met. This phase will usually begin 12-16 weeks after surgery.

Goals

1. Progress from double leg impact control to single leg impact control.
2. Develop proper technique and appropriate neuromuscular control with start and stop movements and change of direction movements.
3. Eliminate apprehension that may exist with complex movements related to sports.

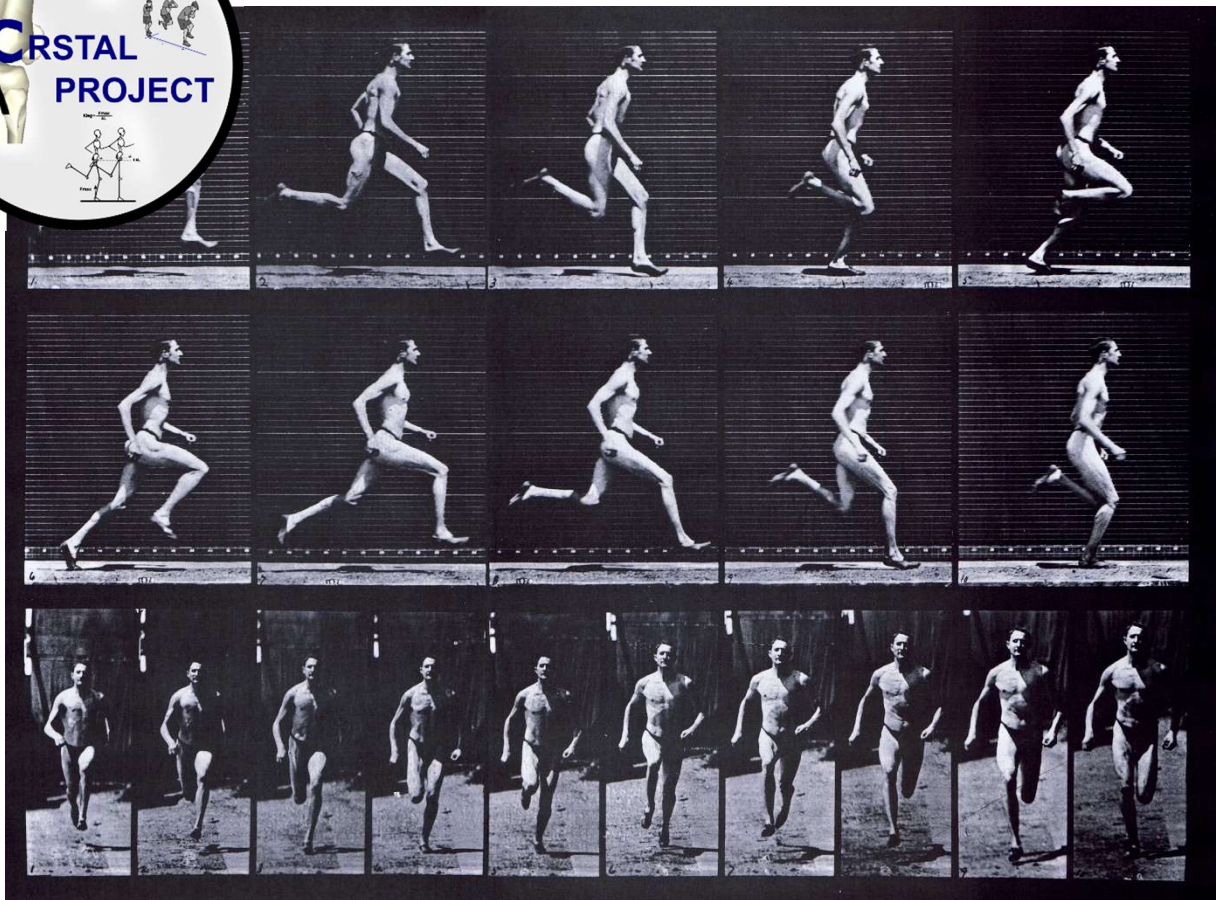
Type of exercises:

- Dynamic Warm Up: will help with increasing core body temperature, mental alertness, elasticity of the muscular system and activation of your neuro-muscular system.
- Multi-planar Landing Control and Neuromuscular Reaction : Jump rotations, fast feet and lunge, multi-planar leap and land, stop and go, hopping.
- Functional movements and strengthening : one legged squat, single leg deadlift, lateral lunge walk, power step up.
- Advanced Core Training and begin for jogging.

Reference

- Shelbourne, K. D., & Nitz, P. (1990). Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*, 18(3), 292–299.
- Kruse, L. M., Gray, B., & Wright, R. W. (2012). Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 94(19), 1737–1748.
- van Melick, N., van Cingel, R. E. H., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hullegie, 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.

3.2. INFLUENCE DE LA RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA SUR LES PARAMETRES BIOMECHANIQUES DE LA COURSE A PIED LORS DE LA PHASE DE RETOUR AU SPORT : ETUDE CONTROLEE.



Ce travail n'ayant pas encore fait l'objet d'une soumission dans une revue internationale anglophone, il est présenté en français mais en respectant la structure IMRaD.

Dans le contexte précédemment présenté, le but de l'étude a été de comparer les paramètres biomécaniques de la course à pied entre une population de patient à 6 mois d'une reconstruction chirurgicale du LCA (patient de la cohorte CR'STAL) et un groupe de sujets sains appariés.

Méthode

Population :

La population était composée de 2 groupes : le groupe CR'STAL et le groupe contrôle. Le groupe CR'STAL comprenait 26 patients qui ont été inclus dans la cohorte CR'STAL entre le mois de juin 2014 et le mois de janvier 2017. Il y avait 12 femmes et 14 hommes ($21,6 \pm 4,6$ ans, $175,7 \pm 6,5$ cm, $72,0 \pm 9,3$ kg). Leur niveau de pratique sportive était en moyenne de $14,3 \pm 2,2$ sur l'échelle de Marx (Marx et *al.*, 2001) et de $8,6 \pm 0,9$ sur l'échelle de Tegner (Lysholm and Tegner, 2007). Quatre patients avaient été opérés par la technique chirurgicale utilisant le tendon rotulien (technique de Kenneth-Jones) et 22 patients par la technique utilisant les tendons du semi-tendineux et gracile (technique du DIDT). Tous les patients avaient reçu la même rééducation standardisée (Annexe 1 de la partie 3.1). Les critères d'inclusions étaient les mêmes que ceux décrits dans la partie 2.3. (Tableau 2.3-1)

Concernant la population contrôle, les volontaires sains ont été choisis pour être appariés en sexe, masse, en taille, en âge et en niveau de pratique sportive. Les critères d'exclusion étaient des antécédents de chirurgie du genou, une contre-indication à la réalisation de la course à pied, une marche anormale, un antécédent de blessure de l'appareil locomoteur dans les 6 derniers mois ayant entraîné un arrêt sportif de plus de 3 semaines. Le groupe contrôle se composait de 14 individus : 4 femmes et 10 hommes ($21,6 \pm 1,6$ ans, $174,4 \pm 9,4$ cm, $69,7 \pm 11,3$ kg). Leur niveau de pratique sportive était en moyenne de $13,4 \pm 2,0$ sur l'échelle de Marx et de $8,1 \pm 1,3$ sur l'échelle de Tegner. Nous avons également pris en compte le membre dominant : 7 sujets présentaient un membre dominant droit, 7 sujets un membre dominant gauche.

Évaluation du pattern de course à pied sur tapis roulant instrumenté à 12 km/h :

Les patients du groupe CR'STAL passaient les évaluations dans l'ordre suivant : un examen clinique, une mesure de la laxité ligamentaire par GNRB®, une mesure des 3 directions pour chaque membre du test SEBT modifié pieds nus avec 2 essais et 2 mesures, puis une

évaluation biomécaniques de la course à pied sur tapis instrumentalisé (ADAL3D-WR; Medical Development, HEF Tecmachine, Andrezieux-Boutheon, France) équipé de 4 capteurs piézoélectriques (KI 9077b, Kistler, Winterthur, Switzerland) après un échauffement de 15 minutes sur cycloergomètre ou en course à pied.

Pour la population contrôle, seule les évaluations biomécaniques de la course à pied ont été réalisés en suivant le protocole de l'étude CR'STAL (partie 2.3 et 3.1) dans le même lieu (Unité de médecine du sport, CHU de Saint-Etienne) et à la même heure de la journée (14h-18h00).

Après avoir recueilli ou calculé pour chaque pas : la longueur de la foulée (Lstep), le temps de contact (Tc), le temps de vol (Tv), le pic actif (P_actif), le pic passif (P_passif), le VALR (vertical average loading rate) et la raideur biomécanique du membre inférieur (Kleg), nous avons calculé la moyenne et l'écart type de chaque variable pour chaque membre inférieur (membre opéré et non opéré, ou membre droit et gauche). Afin d'avoir une analyse globale, nous avons calculée les moyennes des valeurs obtenues pour les deux membres inférieurs, permettant d'analyser l'adaptation globale de la foulée après chirurgie du LCA. Puis nous avons également calculé le ratio de symétrie (Limb Symmetry Index), classiquement utilisé dans les évaluations fonctionnelles des patients opérés du LCA (Logerstedt, 2010) (1). Mais comme il est difficile de définir le membre dominant/non-dominant, et qu'il y a souvent confusion entre le membre inférieur qui possède la meilleure précision et le membre inférieur avec la meilleure force (McGrath et al., 2016), nous avons opté pour le calcul de la valeur absolue de l'indice de symétrie |IA| (Absolut Index of Asymmetry) (2).

$$\text{Limb Symmetry Index} = \frac{X_{Op}}{X_{Nop}} \times 100 \quad (1)$$

$$|IA| = \left| \frac{(X_R - X_L)}{(X_R + X_L) * 1/2} \right| \quad (2)$$

Avec Xop, la valeur du membre opéré, Xnop, la valeur du membre non-opéré, XR la valeur du membre inférieur droit et XL la valeur du membre inférieur gauche.

Analyse statistique

La saisie des données a été réalisée sur Excel 2011 14.4.9® (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Les statistiques descriptives, les tests de normalité et les analyses entre les variables ont été réalisés par le logiciel R (R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>). Après avoir vérifié la normalité des échantillons par le test de Shapiro-Wilk, les tests de Student ou de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été utilisés pour identifier sur les variables biomécaniques une éventuelle différence entre les deux groupes (CR'STAL vs. Contrôle). Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$. Enfin, nous avons calculé la taille d'effet grâce au d de Cohen, normalisant la différence entre les moyennes par l'écart type. Un seuil en dessous de 0,2 correspondait à un effet négligeable, entre 0,2 et 0,5 un effet faible, entre 0,5 et 0,8 un effet moyen, entre 0,8 et 1,2 un effet élevé, et supérieur à 1,2 un effet très élevé (Cohen, 1988; Hopkins, 2018).

Résultats

Les populations étaient comparables au niveau de la masse, de la taille et de l'activité (Tableau 3.2-1). Les paramètres biomécaniques des 2 groupes sont présentés dans le tableau (Tableau 3.2-2).

Tableau 3.2-1. Caractéristiques du groupe CRSTAL et du groupe Contrôle

	Moyenne (Ecart type)		p-value	Taille d'effet		95-IC
	Groupe CRSTAL	Groupe Contrôle				
Taille (cm)	175,7 (6,5)	174,4 (9,4)	0.68	-0.15	Négligeable	[-0.8 - 0.51]
Masse (kg)	72 (9.3) [10.3]	69,7 (11,3)	0.56	-0.18	Négligeable	[-0.86 - 0.49]
Sexe(F/M)	12F/14M	4F/10M				
Membre opéré (ou dominant)	13D/13G	7D/7G				

Des différences significatives existaient seulement pour les variables de symétrie (LSI et |AI|). Pour le LSI, le Tc ($p=0,015$ et $d=-0,67$) et Kleg ($p=0,008$ et $d=0,74$) du groupe CRSTAL étaient plus éloigné du 100% que celui du groupe Contrôle (pour LSI_Tc : CRSTAL : $97,9 \pm 3,2\%$ vs. Contrôle : $99,7 \pm 1,2\%$, et pour LSI de Kleg : CRSTAL $105,4 \pm 8,5\%$ vs. Contrôle : $100,1 \pm 3,1\%$). Pour le LSI du P_actif, nous avons retrouvé la même tendance entre les deux groupes, avec une taille d'effet "moyen" ($d= -0,60$) sans qu'il n'y ait de différence significative ($p=0.10$) (LSI de P_actif : CRSTAL: $97,9 \pm 3,2\%$ vs. Contrôle : $99,7 \pm 1,2\%$).

Tableau 3.2-2. Tableau des valeurs globales des membres inférieurs (valeur moyenne du score du membre opéré et du membre sain) pour les variables biomécaniques lors d'une évaluation sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur et chez des patients sains.

	Moyenne (Ecart type)		p-value	Taille d'effet		95-IC
	Groupe CRSTAL	Groupe Contrôle				
Valeur globale de Lstep(m)	1,16 (0,05)	1,17 (0,05)	0,49	-0,24	Négligeable	[-0,84 - 0,47]
Valeur globale de Tc (ms)	242,11 (16,42)	243,2 (14,42)	0,50	-0,46	Négligeable	[-0,72 - 0,58]
Valeur globale de Tv (ms)	105,49 (17,42)	107,26 (12,28)	0,90	‡ 0,17	Négligeable	[-0,76 - 0,54]
Valeur globale de P_actif en BW	2,42 (0,25)	2,54 (0,17)	0,08	-0,55	Moyen	[-1,21 - 0,12]
Valeur globale de P_passif en BW	1,73(0,20)	1,82(0,26)	0,21	‡ 0,36	Faible	[-0,31 - 1,04]
Valeur globale de VALR (N.BW-1.s-1)	73,33 (14,4)	70,61 (16,85)	0,67	0,13	Négligeable	[-0,48 - 0,84]
Valeur globale de Kleg (kN×m-1)	9,62 (1,89)	9,94 (1,92)	0,87	0,15	Négligeable	[-0,82 - 0,49]
|AI| de Lstep (%)	2,1 (1,8)	1,6 (1)	0,62	‡ 0,31	Faible	[-0,37 - 0,91]
|AI| de Tc (%)	3,1 (2,2)	1,0 (0,6)	<0,001 ***	1,14	Large	[0,44 - 1,8]
|AI| de Tv (%)	5 (4,1)	4,5 (3,3)	0,88	‡ -0,30	Négligeable	[-0,53 - 0,78]
|AI| de P_actif (%)	4,8 (3)	2,5 (2,5)	0,019 *	‡ 0,83	Moyen	[0,13 - 1,45]
|AI| de P_passif (%)	9,7(11,0)	6,1(5,3)	0,49	‡ -0,45	Faible	[-1,14 - 0,22]
|AI| de VALR(%)	8,2 (7,7)	10,8 (12,9)	0,92	‡ -0,11	Faible	[-0,93 - 0,39]
|AI| de Kleg (%)	7,9 (5,2)	2,4 (1,9)	<0,001 ***	1,16	Elevé	[0,54 - 1,93]
LSI de Lstep (%)	98,4(2,3)	99,1 (1,7)	0,30	-0,22	Faible	[-0,88 - 0,44]
LSI de Tc (%)	97,9(3,2)	99,7 (1,2)	0,015 *	-0,67	Moyen	[-1,4 - 0,01]
LSI de Tv (%)	99,8(4,4)	97,7 (5)	0,21	0,23	Faible	[-0,43 - 0,89]
LSI de P_actif (%)	97,5(4,8)	99,7 (3,6)	0,106	-0,60	Moyen	[-1,28 - 0,06]
LSI de P_passif (%)	101,7(8,4)	101,7(8,4)	0,51	-0,21	Faible	[-0,88 - 0,46]
LSI de VALR (%)	96,1(10,4)	102,7 (16,6)	0,19	-0,46	Faible	[-1,13 - 0,2]
LSI de Kleg (%)	105,4(8,5)	100,1 (3,1)	0,008 **	0,74	Moyen	[0,05 - 1,43]

‡ Wilcoxon test * p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001

LSI : Limb Symmetry Index, |AI|:valeur absolu de l'indice d'asymétrie, BW: Poids du corps, Lstep: longueur du pas; Tc : temps de contact ; Tv : temps de vol ; P-actif : pic actif ; P-passif : pic passif ; VALR : vertical average of loading rate ; Kleg : raideur biomécanique du membre inférieur.

Pour l'|AI|, on retrouvait pour les trois variables précitées des différences significatives plus grandes dans le groupe CRSTAL que dans le groupe Contrôle : Tc (p<0.001 et d= 1,14), Kleg (p<0.001 et d= 1,16) et Pic_actif (p=0,019 et d= 0,83).

La comparaison des variables globale entre les deux groupes n'a retrouvé aucune différence significative, avec des tailles d'effet entre négligeable et faible sauf pour Pic_passif (taille d'effet moyen, d=-0,55) (tableau 3.2-2).

Discussion

Les principaux résultats de cette étude montraient qu'il existait une différence significative entre les 2 groupes pour les variables de symétrie du Tc, de Kleg pour le LSI et |AI|, et pour la variable du pic actif pour |AI|. La différence entre les LSI du groupe CR'STAL et du groupe contrôle pour les variables Tc et Pic_actif était plutôt faible (groupe CR'STAL : LSI(Tc)=98,4% et Tc(P_actif)=97,1% et pour le groupe contrôle : LSI(Tc)=99,7% et LSI(P_actif)=99,7%). Par contre pour Kleg, nous observions un LSI du groupe CR'STAL très supérieur au groupe contrôle (groupe CR'STAL : LSI(Kleg)=104,0% et pour le groupe contrôle : LSI(Kleg)=100,1%). A noter que Papas et *al.* ont rapporté des valeurs moyennes de Kleg chez des sujets sains (moyenne de Kleg= 9,8 kN/m, AI=-2,318%) dans le même ordre de grandeur que dans notre groupe contrôle (Kleg = 9,94 kN/m, |AI|=2,4%).

La constitution d'un groupe contrôle apparié a permis d'augmenter la puissance statistique de la comparaison entre le groupe sain et le groupe de patient opéré du LCA des paramètres biomécaniques du membre inférieur. Les résultats mettaient principalement en avant le paramètre de raideur biomécanique comme différent de façon significative entre ces 2 groupes. Cependant, il existait certaines limites. Des données préopératoires et pré-blessures auraient permis de savoir si les différences observées étaient réellement dues à la chirurgie ou existaient avant. Un échantillon plus important de femmes aurait également pu permettre une analyse en sous-groupe hommes/femmes. De plus, dans le groupe CR'STAL, il nous semble que nous aurions pu distinguer 2 sous-groupes : ceux qui ont eu une récupération fonctionnelle optimale (objectivée par les Hop Tests par exemple) et ceux chez qui perdurent des déficits importants, comme l'ont retrouvé Krytisis et al. (Kyrtsis et al., 2016). D'autres analyses sont donc nécessaires.

Tc est une variable biomécanique permettant le calcul de Kleg et ces deux variables sont fortement liées comme Morin et *al.* l'ont démontré ($r^2=0,96$ (Morin et *al.*, 2007)). Ainsi, il est normal de retrouver la variable Tc différente significativement entre les 2 groupes parallèlement aux différences observées sur Kleg.

Kleg est retrouvé plus grand dans le groupe CR'STAL que dans le groupe contrôle, ce qui est cohérent avec les résultats retrouvés dans une étude pilote sur 9 patients après reconstruction du LCA (à plus d'un an de la chirurgie) par Mazet et *al.* (Mazet et *al.*, 2016). Cependant, leur étude comportait un nombre important de limites. Outre la taille d'échantillon faible, il apparaissait un temps postopératoire non homogène, une évaluation de la course à pied seulement sur 5 à 6 foulées,

et une vitesse imposée à 10 km/h (réalisée sur le système Gaitrite (GAITRite Gold, CIR Systems, Havertown, PA, États-Unis) donc à une vitesse difficilement constante). Notre étude permet donc d'étendre les données sur le domaine de l'analyse de la raideur biomécanique de la course à pied après reconstruction chirurgicale du LCA, et de confirmer ces résultats préliminaires avec une méthodologie plus solide, pour une population sportive voulant reprendre le sport. En effet les points forts de notre étude sont la constitution d'un groupe de patient de façon prospectif, ayant permis la constitution d'une cohorte homogène du niveau et de la quantité de pratique sportive avant la blessure. De plus l'utilisation d'un tapis instrumenté offre une mesure précise des paramètres de la course à pied : vitesse de course, temps de contact, temps de vol et réaction verticale du sol.

Ainsi cette modification de Kleg nous permet d'émettre l'hypothèse d'une stratégie de protection. Elle pourrait être due à une stratégie de "quad avoidance", stratégie d'évitement du travail excentrique du quadriceps, lors de la phase de réception d'un saut ou lors de la phase d'appui de la course à pied (Berchuck *et al.*, 1990; Pamukoff *et al.*, 2018; Rudolph *et al.*, 2001) ou de la persistance d'une co-contraction des ischio-jambiers et du quadriceps, permettant la protection du transplant et la stabilisation de l'articulation (Benedetti *et al.*, 1999; Rudolph *et al.*, 2001). Il est à noter que lorsque l'augmentation de Kleg est associée à un facteur externe (surface de course plus souple, apparition de la fatigue induite par la course à pied (Morin and Samozino, 2018)) il est alors observé une diminution du temps de contact ou augmentation de la fréquence du pas lors de la course à pied (Morin *et al.*, 2007). Les adaptations biomécaniques des membres inférieurs s'organisent alors de façon bilatérale.

Mais face à un facteur interne, comme une lésion musculaire induite par biopsie musculaire (Morin *et al.*, 2009), il semblerait que les adaptations s'organisent de façon asymétrique pour diminuer les contraintes sur le membre lésé. Chez le patient opéré d'un LCA, il semblerait qu'il en soit de même. Certains patients développent une asymétrie adaptative de Kleg, augmenté sur le membre opéré. Cette raideur pourrait alors être le témoin d'une stratégie globale protectrice, de "quad avoidance", ou tout simplement par une co-contraction excessive des muscles périarticulaires, par surprotection du membre opéré.

L'analyse de la taille d'effet, pour les variables globales des membres inférieurs, nous indique qu'il y a un effet groupe d'intensité moyenne pour le pic actif, valeur maximum du vGRF lors des pas, plus faible dans le groupe CR'STAL. Cela va encore dans le sens d'une stratégie de protection de l'articulation. Il serait donc intéressant d'étudier chez ces patients ces stratégies

permettant d'augmenter Kleg ou de diminuer le pic actif, grâce à une analyse EMG du quadriceps et des ischio-jambiers et par une analyse cinématique de la course à pied. Il serait également pertinent d'analyser si la vitesse de course à pied, ou la fréquence de foulée ont un impact sur Kleg et sa symétrie chez ces patients.

Il est à noter que même si le pattern de la course à pied était proche de la symétrie pour les 2 groupes, il existait une asymétrie plus grande pour Kleg dans le groupe CR'STAL, avec un Kleg du membre opéré plus important. L' $|AI|$ était également plus grand que le LSI et permettait de mieux objectiver l'asymétrie de Kleg. Ainsi, grâce à la relative facilité de calcul de Kleg sur un tapis roulant (grâce à des applications sur smartphone (runmatic (Balsalobre-Fernández et al., 2017; Rodríguez, 2018)), ou à des cellules photoélectriques (optojump® (Ammann et al., 2016))), ce paramètre biomécanique de la course à pied pourrait être un paramètre à étudier dans le suivi des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du LCA.

Conclusion

Il existe donc une différence significative dans la symétrie du pattern biomécanique de la course à pied chez les patients après reconstruction chirurgicale du LCA, et principalement pour le paramètre de raideur biomécanique du membre inférieur. L'utilisation de la valeur absolue de l'indice de symétrie permet de mettre en avant cette asymétrie par rapport au ratio de LSI. De plus, la variabilité de certains paramètres nous fait penser qu'il existe des sous-groupes chez les patients opérés (une meilleure récupération fonctionnelle chez certains). Le paramètre de raideur biomécanique du membre inférieur pourrait être utilisé dans le suivi des patients opérés du LCA comme un véritable marqueur biomécanique de la chirurgie et pourrait permettre d'individualiser les différentes phases du RTS continuum et la décision de retour au sport avec pivot/contact.

3.3. LIEN ENTRE EVALUATION BIOMECHANIQUE DE LA COURSE A PIED A 6 MOIS POSTOPERATOIRES D'UNE RECONSTRUCTION CHIRURGICALE DU LCA ET NOUVELLE BLESSURE DU LCA.



Ce travail n’ayant pas encore fait l’objet d’une soumission dans une revue internationale anglophone, il est présenté en français mais en respectant la structure IMRaD.

Introduction

À partir de 6 mois postopératoires d’une reconstruction chirurgicale du LCA, selon les recommandations actuelles (van Melick et *al.*, 2016), la reprise du sport de pivot/contact peut être envisagée. Pour aider le clinicien dans sa décision d’autorisation ou non de la reprise du sport de pivot/contact, de plus en plus de batteries de tests sont proposées dans la littérature (Barber-Westin and Noyes, 2011b; Grindem et *al.*, 2016; Kyritsis et *al.*, 2016). Kyritsis et *al.* ont montré, par exemple, que les patients qui reprenaient le sport pivot/contact sans atteindre certains critères objectifs basés sur des évaluations isocinétiques, des Hop Tests, et des tests de terrain, avaient 4 fois plus de risque d’avoir une récurrence de rupture du LCA opéré (Kyritsis et *al.*, 2016). Cependant, dans le groupe ayant validé ces critères, 10% avaient tout même présenté une récurrence de rupture du LCA.

Les résultats de cette étude soutiennent l’intérêt d’améliorer les batteries de tests proposées, et d’explorer de nouveaux critères d’évaluation. L’évaluation biomécanique de la course à pied nous semble être un moyen supplémentaire d’évaluer la récupération fonctionnelle et les capacités du patient à reprendre des activités plus complexes, notamment les pivots. En effet, la récupération d’un pattern biomécanique de la course à pied ne semble pas totalement dépendre de la date de reprise de la course à pied (partie 2.3). Le paramètre de la « raideur biomécanique du membre inférieur » apparaît comme un élément sensible à la chirurgie du LCA lors de la course à pied (partie 3.2).

Dans cette nouvelle étude, notre objectif a donc été d’analyser le lien entre les paramètres biomécaniques de la course à pied obtenus à 6 mois postopératoires et la survenue ou non d’une nouvelle blessure du LCA (opéré ou controlatéral) dans les deux ans après la reconstruction chirurgicale du LCA.

Cette étude n’a pas encore fait l’objet d’une publication. Ainsi, les aspects méthodologiques, les résultats et la discussion seront présentés ci-après.

Méthode

Cette étude a suivi le protocole expérimental de CR'STAL (partie 3.1) et les évaluations biomécaniques de la course à pied ont été décrites dans la partie 2.3.

Concernant la population, à partir de la population CR'STAL incluse et décrite dans la partie 3.2, deux sous-groupes ont été constitués rétrospectivement grâce au recueil des blessures par un suivi de deux ans (voir partie 3.1) : le groupe " CB " correspondait au groupe de patients ayant subi une nouvelle blessure du LCA (genou opéré ou controlatéral), et le groupe " CNB " correspondait aux patients n'ayant pas eu de nouvelle blessure d'un ou des deux genoux.

Les évaluations réalisées ont été les mêmes que décrites précédemment dans la partie 2.3.

Analyse statistique

La saisie des données a été réalisée sur Excel 2011 14.4.9® (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Les statistiques descriptives, les tests de normalité et analyses entre les variables ont été réalisés par le logiciel R (R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Austria.URL <http://www.R-project.org/>).Après avoir vérifié la normalité des échantillons par le test de Shapiro-Wilk, les tests de Student ou de Wicoxon-Mann-Whitney appariés ont été utilisés pour faire une analyse intra-groupe afin d'identifier les différences entre le genou opéré et sain pour les variables biomécaniques de la course à pied de chacun des deux sous-groupes : CB et CNB. Puis une analyse inter-groupe a été réalisée (CB vs. CNB) grâce aux tests de Student ou de Wicoxon-Mann-Whitney, non appariés, pour tester une différence entre les deux sous-groupes sur les variables biomécaniques pour le côté sain, le côté opéré, le LSI et l'Asym Index. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$. Enfin, pour chaque analyse nous avons calculé la taille d'effet grâce au d de Cohen, normalisant la différence entre les moyennes par l'écart type. Un seuil en dessous de 0,2 correspondait à un effet négligeable, entre 0,2 et 0,5 un effet faible, entre 0,5 et 0,8 un effet moyen, entre 0,8 et 1,2 un effet élevé, et supérieur à 1,2 un effet très élevé (Cohen 1988; Hopkins 2018).

Résultats

Les caractéristiques des deux groupes sont présentées dans le tableau 3.3-1. Le groupe avec nouvelle blessure du LCA (CB) comportait 5 patients, et le groupe sans blessure (CNB), 21 patients.

Tableau 3.3-1. Caractéristiques des patients à 6 mois d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des deux sous-groupes CNB et CB.

	CNB	CB	p=
Répartition Hommes (H) / Femmes (F)	H : 13 / F : 8	H : 1 / F : 4	0,14 (Test exact de fisher)
Genou opère (D : droite / G : gauche)	D : 10 / G : 11	D : 3 / G : 2	1,0 (Test exact de fisher)
	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)	
Taille en cm	175,6 (10,3)	170,6 (6,9)	0,23
Masse en kg	70,9 (13,7)	64,8 (4,2)	0,10
Temps entre l'évaluation et la chirurgie (en semaines)	26,9 (1,1)	26,4 (1,4)	0,49
Temps entre la reprise de la course à pied et la chirurgie (en semaines)	18,7 (5,0)	17,1 (3,3)	0,43

ET : écart type ; CNB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients non blessés ; CB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients ayant eu une nouvelle blessure du LCA.

* :p<0,05

Dans le tableau 3.3-2 suivant, les comparaisons intra-groupes des évaluations réalisées au 6^{ème} mois postopératoire sont reportées. Le groupe CNB montre des différences significatives entre le genou opéré et le genou sain pour la longueur de foulée (différence de 1cm, p=0,019), pour le temps de contact (différence de 3,4ms, p=0,035) et pour le pic actif (différence de 0,09 BW, p=0,018) et aucune différence significative pour Kleg (différence de -1,0 kN/m, p=0,08). Mais pour le groupe CB, seule la variable Kleg était différente de façon significative entre les deux côtés (différence de 1,3 kN/m, p=0,017).

Tableau 3.3-2. Comparaisons intra-groupes des évaluations biomécaniques de la course à pied sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des sous-groupes CNB et CB.

Longueur de la foulée moyenne en m	Groupe	Genou sain	Genou Opéré	Diff	p =	LSI	Asym index
Temps de vol moyen en ms		Moyenne (ET)	Moyenne (ET)			(en %)	(en %)
Temps de contact moyen en ms	CNB	1.16(0,06)	1.15(0,05)	-0,01	0,019 *	99(1,9)	-1(1,9)
Pic actif moyen BW		115(14,1)	114,8(11,6)	-0,1	0,90	100,2(4,7)	0,1(4,7)
Pic passif moyen BW β		234,6(14,6)	231,1(14)	-3,4	0,035 *	98,6(2,9)	-1,5(2,9)
VALR moyen BW/s		2,50(0,19)	2,44(0,23)	-0,09	0,018 *	97,6(4,2)	-2,5(4,3)
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m β		1,78(0,28)	1,82(0,29)	-0,03	0,56	102,5(9,1)	2,1(8,6)
		76,8(20,8)	75,8(22,7)	-1,0	0,49	98,3(8,6)	-2,1(8,5)
		10,6(2,3)	10,9(1,9)	0,3	0,08	103,7(8,1)	3,4(7,9)
Longueur de la foulée moyenne en m	CB	1,17(0,06)	1,12(0,06)	-0,05	0,06	95,8(2,3)	-4,3(2,4)
Temps de vol moyen en ms		237,9(14,8)	225,6(8,8)	-12,2	0,06	95(2,7)	-5,2(2,9)
Temps de contact moyen en ms		112,2(18,5)	109,7(17)	-2,5	0,16	97,9(2,6)	-2,1(2,6)
Pic actif moyen BW		2,28(0,39)	2,19(0,27)	-0,09	0,26	97(7,5)	-3,3(7,5)
Pic passif moyen BW β		1,93(0,19)	1,9(0,17)	-0,03	0,38	98,4(4)	-1,7(4,1)
VALR moyen BW/s		83,3(29,3)	73,7(34,5)	-9,6	0,12	87(13,3)	-14,8(15,6)
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m β		10,6(1,3)	12(1,7)	1,3	0,017 *	112,6(7,3)	11,6(6,5)

β : Test de Wilcoxon réalisé ; Diff : différence des moyennes entre les deux groupes ; ET : écart type ; CNB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients non blessés ; CB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients ayant eu une nouvelle blessure du LCA.

* : $p < 0,05$

Les comparaisons inter-groupes ont été rapportées dans les tableaux 3.3-3 ci-dessous. Il existait une différence significative entre les deux sous-groupes avec des valeurs plus faibles dans CB par rapport à CNB pour le LSI de la longueur de foulée (CNB 99,0% vs. CB 95,8% ; $p=0,03$) et le LSI du temps de contact (CNB 98,6% vs. CB 95,0% ; $p=0,04$). Pour les index de symétrie, l'Asymétrie index de la longueur de foulée (CNB -1,0% vs. CB -4,3% ; $p=0,03$) et du temps de contact (CNB -1,5% vs. CB -5,2% ; $p=0,04$) sont également retrouvés plus faibles dans le groupe CNB que dans le groupe CB. Il en était de même pour Kleg (groupe CNB 3,4% et groupe CB 11,6% ; $p=0,04$).

Tableau 3.3.3. Comparaisons inter-groupe des évaluations biomécaniques de la course à pied sur tapis roulant instrumenté, à 12 km/h, chez des patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur en fonction des sous-groupes CNB et CB.

	CNB	CB		Diff	p=	Taille d'effet (d=)	
Genou sain	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)					
Longueur de la foulée moyenne en m	1,2(0,1)	1,2(0,1)	β	0,0	0,85	0,0	
Temps de contact moyen en ms	234,6(14,6)	237,9(14,8)		3,3	0,67	-0,2	
Temps de vol moyen en ms	115,0(14,1)	112,2(18,5)		-2,7	0,77	0,2	
Pic actif moyen BW	2,5(0,2)	2,3(0,4)		-0,2	0,29	0,9	Elevé
Pic passif moyen BW	1,8(0,3)	1,9(0,2)	β	0,2	0,25	-0,6	Moyen
VALR moyen BW/s	76,8(20,8)	83,3(29,3)		6,5	0,66	-0,3	
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m	10,6(2,3)	10,6(1,3)	β	0,1	0,57	0,0	
Genou opéré							
Longueur de la foulée moyenne en m	1,2(0,1)	1,1(0,1)		0,0	0,24	0,7	Moyen
Temps de contact moyen en ms	231,1(14,0)	225,6(8,8)	β	-5,5	0,20	0,4	
Temps de vol moyen en ms	114,8(11,6)	109,7(17,0)		-5,1	0,55	0,4	
Pic actif moyen BW	2,4(0,2)	2,2(0,3)		-0,2	0,11	1,1	Elevé
Pic passif moyen BW	1,8(0,3)	1,9(0,2)		0,1	0,44	-0,3	
VALR moyen BW/s	75,8(22,7)	73,7(34,5)		-2,1	0,90	0,1	
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m	10,9(1,9)	12,0(1,7)		1,1	0,23	-0,6	Moyen
LSI (en %)							
Longueur de la foulée moyenne en m	99,0(1,9)	95,8(2,3)		-3,2	0,03	*	1,6 Très élevé
Temps de contact moyen en ms	98,6(2,9)	95,0(2,7)		-3,6	0,04	*	1,3 Très élevé
Temps de vol moyen en ms	100,2(4,7)	97,9(2,6)		-2,3	0,16		0,5 Moyen
Pic actif moyen BW	97,6(4,2)	97,0(7,5)		-0,6	0,87	0,1	
Pic passif moyen BW	102,5(9,1)	98,4(4,0)		-4,1	0,14	0,5	
VALR moyen BW/s	98,3(8,6)	87,0(13,3)		-11,3	0,13	1,2	Elevé
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m	103,7(8,1)	112,6(7,3)		8,8	0,05	-1,1	Elevé
Asym Index (en %)							
Longueur de la foulée moyenne en m	-1,0(1,9)	-4,3(2,4)		-3,3	0,03	*	1,7 Très élevé
Temps de contact moyen en ms	-1,5(2,9)	-5,2(2,9)		-3,7	0,04	*	1,3 Très élevé
Temps de vol moyen en ms	0,1(4,7)	-2,1(2,6)		-2,3	0,18	0,5	Moyen
Pic actif moyen BW	-2,5(4,3)	-3,3(7,5)		-0,8	0,84	0,2	
Pic passif moyen BW	2,1(8,6)	-1,7(4,1)		-3,8	0,17	0,5	
VALR moyen BW/s	-2,1(8,5)	-14,8(15,6)		-12,7	0,14	1,3	Elevé
Raideur biomécanique du membre inférieur kN/m	3,4(7,9)	11,6(6,5)		8,3	0,04	*	-1,1 Elevé

β : Test de Wilcoxon réalisé ; ET : écart type ; Diff : différence des moyennes entre les deux groupes ; CNB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients non blessés ; CB : sous-groupe de l'étude CR'STAL incluant des patients ayant eu une nouvelle blessure du LCA.

* : p<0,05

Discussion

Les principaux résultats de notre étude montraient une différence significative de la raideur biomécanique du membre inférieur en course à pied, et une différence plus importante d'asymétrie de longueur de foulée, de temps de contact et de vol, de taux de chargement (VALR) (avec une taille d'effet de "moyen" à "très élevé") entre les patients qui avaient et n'avaient pas eu de nouvelle blessure du LCA (opéré ou controlatéral) dans les 2 ans après la reconstruction chirurgicale du LCA.

Nous avons également rapporté une relative asymétrie des paramètres biomécaniques de la course à pied dans le groupe CB (asymétrie comprise entre -1,7 et -14,8%) comparé au groupe CNB (asymétrie comprise entre 0,1 et 3,4%). Cette asymétrie des paramètres biomécaniques du groupe CB pourrait être le reflet objectivable des adaptations biomécaniques du pattern de course comme retrouvées dans la littérature (Berchuck et *al.*, 1990; Rudolph et *al.*, 2001; Tashman et *al.*, 2007; Thomson et *al.*, 2018). Cette asymétrie pourrait également refléter une insuffisance de récupération fonctionnelle, comme retrouvée très souvent dans des études (Lepley LK., 2015; Palmieri-Smith et *al.*, 2008; Thomeé et *al.*, 2011). Ce déficit trop important serait alors mal compensé par le patient, ne permettant pas de produire un pattern de course symétrique (Karanikas et *al.*, 2009). Alors que nous avons rapporté dans l'étude 2.3 qu'il n'existait pas d'asymétrie du pattern de course à pied à 6 mois d'une reconstruction chirurgicale du LCA, les résultats de cette présente étude rapporteraient une asymétrie chez les patients qui vont présenter une nouvelle blessure du genou. Nous émettons donc l'hypothèse du lien entre cette asymétrie et une mauvaise récupération fonctionnelle, et avec pour conséquence un risque accru de blessure.

Tout comme Morin et *al.* l'ont rapporté, Kleg est généralement augmenté par la fatigue centrale, par la douleur ou par la surface de course (Morin and Samozino, 2018) et dans ces conditions, ces adaptations se font généralement de façon bilatérale. Chez le patient opéré d'un LCA, lors de la reprise du sport, il semblerait que certains patients développent une asymétrie adaptative de Kleg. Une trop grande asymétrie pourrait être le reflet d'un manque de récupération fonctionnelle, de la persistance de douleur ou de l'inflammation localisée. Elle se caractériserait par une adaptation asymétrique globale du membre inférieur lors de la tâche spécifique de la locomotion.

Ainsi l'analyse biomécanique de la course à pied, et plus précisément le paramètre de raideur biomécanique du membre inférieur, pourrait permettre une analyse macroscopique et un aperçu global des adaptations biomécaniques lors de la course à pied après reconstruction

chirurgicale du LCA. Ainsi elle pourrait être un nouveau critère à inclure dans la batterie de test permettant d'aider à la décision de reprise du sport. La simple mesure du temps de contact et du temps de vol lors d'une course sur tapis roulant permettent une mesure fiable de ce paramètre Kleg (Balsalobre-Fernández *et al.*, 2017; Pappas *et al.*, 2014). De nouveaux outils comme l'optojump® (Ammann *et al.*, 2016) ou des applications smartphones comme l'application "runmatic" (Rodríguez, 2018) pourraient permettre aux cliniciens équipés d'un tapis roulant d'utiliser ce nouveau paramètre, et de l'inclure facilement dans le temps d'évaluation sans coût excessif.

Dans le cadre de la comparaison des évaluations réalisées pour la reprise du sport pivot/contact, il semble important de caractériser les asymétries des variables par un indice ou ratio. Le plus utilisé est le ratio LSI. Cependant, il surestime la récupération du patient (Wellsandt *et al.*, 2017) car qu'il est très souvent observé une baisse de performance sur le membre controlatéral (Pairot de Fontenay *et al.*, 2014; Pairot De Fontenay *et al.*, 2015; Wellsandt *et al.*, 2017). L'utilisation du ratio LSI devrait donc laisser place à l'Asymmetry Index qui permet de mieux quantifier la récupération fonctionnelle et prend en compte la performance du test réalisé. De plus, l'Asymmetry Index est le plus sensible pour évaluer la symétrie d'un pattern de locomotion (Błażkiewicz *et al.*, 2014).

Il semble important de bien définir les critères anthropomorphiques afin de pouvoir comparer les individus entre eux en normalisant ces variables par la masse, la taille, ou l'IMC (Indice de masse corporel). De plus le risque de nouvelles blessures est plus fréquent chez les femmes que chez les hommes (Montalvo *et al.*, 2018), et il semblerait pertinent de faire le distinguo entre homme/femme. Dans l'optique d'une reprise du sport et donc de la performance, ces critères permettraient de mesurer la récupération fonctionnelle, mais surtout la récupération de la performance pour le patient sportif afin d'optimiser le retour à la performance, 3^{ème} et dernière étape du RTS continuum.

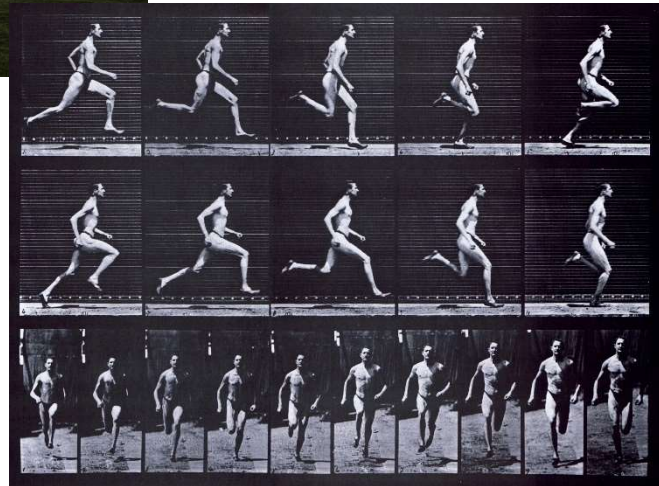
Cette présente étude comporte cependant des limites. En effet, ces résultats sont à prendre avec précaution, car la taille du groupe avec une nouvelle blessure du LCA est faible (n=5). Cependant, la convergence d'une différence significative et d'une taille d'effet élevé des variables « Temps de contact » et « Kleg » nous fait penser que le paramètre « Kleg » est un paramètre pertinent dans l'amélioration des critères de reprise du sport après reconstruction chirurgicale du LCA. Mais, d'autres inclusions sont nécessaires pour affirmer le lien entre l'asymétrie de Kleg et

le risque de blessure, et d'autres études doivent objectiver le seuil d'asymétrie permettant un retour au sport avec le moins de risque possible de nouvelle blessure du LCA.

Conclusion

Lors des évaluations du 6^{ème} mois postopératoire après reconstruction chirurgicale du LCA, notre étude nous a permis de mettre en évidence une différence significative des indices de symétrie du temps de contact et de la raideur biomécanique du membre inférieur, entre un groupe de patients qui a eu et celui qui n'a pas eu de lésion du LCA (récidive du côté opéré ou controlatéral sain) dans les 2 ans après la chirurgie. Ainsi, ces résultats sur une population certes, de faibles effectifs, nous permettent d'envisager l'évaluation de la raideur biomécanique comme un élément à inclure dans la batterie de tests pour autoriser la reprise du sport pivot/contact après reconstruction chirurgicale du LCA. Cependant, d'autres inclusions sont nécessaires pour affirmer le lien et de définir le seuil d'asymétrie pertinent pour un retour au sport à faible risque de nouvelle blessure.

3.4 SYNTHÈSE SUR LA COURSE À PIED COMME CRITÈRE DE RETOUR AU SPORT



Ces trois études ont permis d'apporter des informations importantes pour répondre à notre problématique concernant l'intérêt de l'évaluation de la course à pied pour aider la décision de retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA.

Nous avons proposé tout d'abord un protocole expérimental pour répondre à cet objectif : l'étude CR'STAL (Criteria for Return to Sport after ACL reconstruction), étude prospective de cohorte, avec des évaluations répétées à 6, 9 et 12 mois après reconstruction chirurgicale du LCA, et un suivi des blessures jusqu'à 24 mois postopératoires. Le protocole d'évaluation comportait un examen clinique, des questionnaires algofonctionnels, des questionnaires évaluant la kinésophobie, une évaluation mécanisée de la laximétrie par GNRB®, des tests de l'équilibre et de la proprioception, une analyse biomécanique de la course à pied, des Hop Tests, et une évaluation musculaire isocinétique des extenseurs et fléchisseurs du genou. Cette étude a reçu l'approbation par le Comité d'éthique du Centre Hospitalo-Universitaire de Saint-Etienne (numéro de référence IRBN522015 / CHUSTE) et elle a pour objectif de déterminer de nouveaux critères de reprise du sport.

La deuxième étude comparait les paramètres biomécaniques de la course à pied entre une population de patients à 6 mois postopératoire d'une chirurgie du LCA (patient de la cohorte CR'STAL) à un groupe de sujets sains appariés. Nos résultats montraient une asymétrie plus importante, statistiquement significative, de la raideur biomécanique du membre inférieur (Kleg) du groupe "CR'STAL" par rapport au groupe contrôle. Ainsi, ce paramètre facilement mesurable lors d'une évaluation de la course à pied sur tapis roulant semble être un paramètre intéressant à mesurer. Il pourrait permettre d'analyser les adaptations biomécaniques du pattern de course à la suite de la chirurgie du LCA, et au cours du retour du sport et de son continuum.

Dans notre troisième étude, nous avons cherché à savoir s'il existait des différences dans les paramètres biomécaniques de la course à pied entre un groupe de patients qui a eu une nouvelle lésion du LCA (récidive du côté opéré ou controlatéral) : groupe CB ; un groupe de patients sans nouvelle lésion dans les 2 ans après la chirurgie : groupe CNB. Nos résultats ont montré que l'indice d'asymétrie de Kleg du groupe CB était plus important que pour le groupe CNB. Nous avons également rapporté une relative symétrie des paramètres biomécaniques de la course à pied dans le groupe CNB (asymétrie comprise entre 0,1 et 3,4%) comparé au groupe CB (asymétrie comprise entre 1,7 et 14,8%). Ainsi, ces résultats sur une population de faible effectif nous permettent d'envisager l'évaluation de la raideur biomécanique comme un élément à inclure dans

la batterie de tests pour autoriser la reprise du sport pivot/contact après reconstruction chirurgicale du LCA. Cependant, ces résultats doivent être confirmés par un plus grand nombre de patients et affinés pour définir un seul d'asymétrie pertinent pour un retour au sport avec un risque minime de blessure.

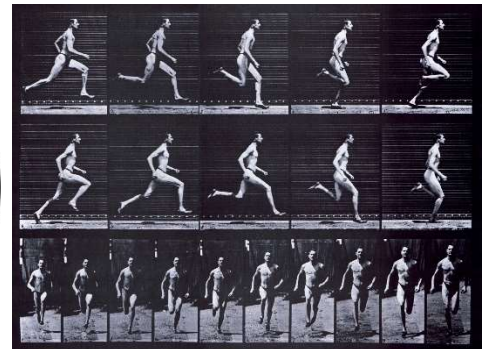
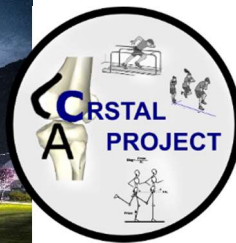
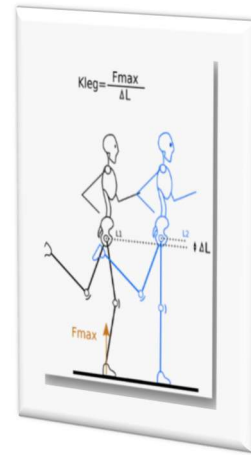
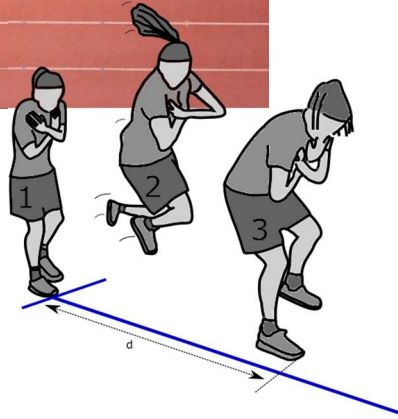
D'autres limites sont à mentionner. Plus de données préopératoires et pré-blessures auraient permis de savoir si les différences observées étaient réellement dues à la chirurgie ou étaient déjà préexistantes avant la rupture initiale ou avant la chirurgie. Un échantillon plus important de femmes aurait également pu permettre une analyse en sous-groupe hommes/femmes. La taille du groupe avec une nouvelle blessure du LCA dans l'étude 3.3. reste faible.

Cependant, la convergence d'une différence significative et d'une taille d'effet élevé des variables « Temps de contact » et « Kleg » nous fait penser que le paramètre Kleg est un paramètre pertinent dans l'amélioration des critères de reprise du sport après reconstruction chirurgicale du LCA. Les résultats de ces premiers travaux ont permis d'élargir le champ des connaissances dans le domaine du pattern biomécanique de course à pied des patients après reconstruction chirurgicale du LCA et les possibles liens avec la survenue d'une nouvelle blessure. Des études supplémentaires sont néanmoins nécessaires pour confirmer ces pistes et définir clairement les critères de Kleg permettant la reprise du sport pivot/contact avec le moins de risque de blessure possible.

Partie IV :

Discussion générale

4.1 SYNTHESE DES TRAVAUX



L'objectif général de ce travail de thèse était centré sur l'apport de la course à pied dans le retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA. Après ce type de chirurgie, l'objectif principal du patient est la reprise du sport (RTS). Il est suggéré de la réaliser en plusieurs étapes : 1) retour aux activités sollicitant peu le LCA, 2) retour aux activités pivot/contact sans compétition, et 3) retour à la compétition (Arderm *et al.*, 2016).

Ce travail de thèse commençait par définir les pratiques de décision du retour à la course à pied (RTR) par une *scoping review*. Les résultats de cette étude mettaient en évidence le manque d'utilisation de critères objectifs, avec seulement une étude sur 5 qui associait le délai postopératoire à un examen clinique, à une évaluation de force musculaire ou à des tests fonctionnels. Une des conclusions de ce travail était que les Hop Tests, tests fonctionnels le plus souvent cités, pourraient être un bon moyen d'individualiser cette décision, car ce sont des tests *i)* simples demandant peu de moyens pour les mettre en application, *ii)* reproductibles pour tester les capacités fonctionnelles des membres inférieurs, et *iii)* ils permettent également d'objectiver la récupération fonctionnelle et de la suivre au cours de la rééducation.

Notre seconde étude a permis de démontrer la grande variabilité des scores de symétrie des Hop Tests aux dates communément utilisées pour le RTR (3^{ème} et 4^{ème} mois postopératoires). Cette variabilité diminuait avec le temps postopératoire, et nous l'avons interprétée comme une différence de récupération inter-individus. Ces résultats soulignaient ainsi l'importance d'individualiser le RTR grâce à des tests fonctionnels comme les Hop Tests, plutôt que d'utiliser seulement le délai postopératoire.

La réathlétisation se déroule principalement entre le RTR et le RTS. Cependant, ce temps de réathlétisation n'est pas homogène pour tous les patients à la date des évaluations du RTS (en règle générale à 6 mois postopératoires). Ainsi, ils n'ont pas tous eu le même volume de temps de réathlétisation à la course à pied. Nous avons donc étudié les liens potentiels entre le temps de réathlétisation et les paramètres biomécaniques de la course à pied. Nous avons retrouvé des corrélations significatives uniquement avec la longueur de la foulée pour le membre opéré et le membre sain, indiquant une adaptation potentielle bilatérale du pattern de course à pied pour ce paramètre. Ainsi, lors de la reprise de la course à pied, les patients adapteraient de façon globale leur pattern de course afin de répondre aux changements de contraintes articulaires induits par la course à pied et sa progression. Par contre, la raideur biomécanique du membre inférieur (Kleg) a été retrouvée augmentée pour le genou opéré sans qu'elle soit influencée par le temps de réathlétisation. Ainsi lors des évaluations pour le RTS, l'analyse de ce paramètre semble avoir toute sa place dans la batterie de tests réalisés.

Ensuite, nous avons proposé un protocole expérimental (étude CR'STAL : Criteria for Return to Sport after ACL reconstruction, ayant obtenu l'accord du comité d'éthique du Comité d'éthique du Centre Hospitalo-Universitaire de Saint-Etienne (numéro de référence IRBN522015/CHUSTE) dont le but était de mieux définir les critères des évaluations classiquement réalisées pour autoriser le RTS. Cette étude monocentrique, dans un premier temps, proposait de définir grâce à certaines méthodes statistiques (analyses hiérarchiques, fouille de données) des nouveaux critères pour le RTS et leur importance dans cette décision. L'originalité de cette étude a été également dans l'utilisation d'une évaluation de la course à pied standardisée proposant des mesures quantitatives et objectives de cette tâche de locomotion complexe. Cette évaluation permet une analyse macroscopique d'indicateurs simples et reproductibles tel que le temps de contact, le temps de vol, la longueur de foulée, mais aussi Kleg. Elle permet également une analyse un peu plus fine du pattern de course à pied par analyse de la force de réaction du sol lors de l'impact (pic actif, pic passif, *Loading Rate*).

Afin de mieux analyser les paramètres de ce type d'évaluation, nous avons comparé les évaluations des patients inclus dans l'étude CR'STAL à 6 mois postopératoires d'une reconstruction chirurgicale du LCA, avec un groupe contrôle apparié en masse, en taille et en activité sportive. Nous avons tout d'abord effectué une analyse macroscopique des deux groupes, par l'analyse des valeurs globales des membres inférieurs, afin de déterminer s'il existait des adaptations bilatérales du pattern de course après chirurgie du LCA. Nous n'avons pas retrouvé de différence significative pour les valeurs globales des variables. Puis lors de l'analyse des asymétries, nous avons retrouvé des valeurs plus grandes dans le groupe de patients opérés pour le temps de contact et Kleg. Ainsi Kleg, par son asymétrie lors d'évaluation du pattern de la course à pied, semble être un marqueur de la chirurgie du LCA.

Enfin, nous avons cherché à savoir si Kleg pouvait être prédictif de nouvelles blessures du LCA. Nous avons constitué 2 groupes de patients suivis sur 24 mois dans l'étude CR'STAL : CNB : groupe CR'STAL Non Blessé ; et CB : groupe CR'STAL Blessé. Dans le groupe CNB, aucune différence significative de Kleg n'était retrouvée entre les 2 membres inférieurs, alors que dans le groupe CB, le Kleg du genou opéré présentait en moyenne une valeur plus importante significativement que celui du genou sain (différence de 1,3 kN/m, $p=0,0017$). De même, nous avons observés que les indices d'asymétries de Kleg du groupe CB étaient largement supérieurs que ceux du groupe CNB (CB : LSI=112,6% / AI=11,6% ; CNB : LSI=103,7% / AI=3,4%).

Finalement, en faisant la synthèse de l'ensemble de ces travaux, nous sommes arrivés aux hypothèses et conclusion suivantes : 1) la reprise de la course à pied doit être prise en compte et

déterminée de manière plus rigoureuse et individualisée en utilisant des critères objectifs ; 2) la course à pied peut être également analysée lors du retour au sport et le paramètre Kleg semble être le paramètre le plus pertinent dans cette analyse objective ; 3) le paramètre Kleg pourrait également être un indicateur prédictif d'une nouvelle blessure par l'analyse de sa symétrie ; et 4) le paramètre Kleg semble donc être la résultante de complexes facteurs internes, perturbateurs de la locomotion après chirurgie du LCA et permettrait de les objectiver.

4.2 LIMITES

Ces conclusions restent en partie à confirmer, compte tenu de limites précédemment discutées et celles présentées ci-dessous.

Les résultats de nos études s'appliquent uniquement à une population spécifique de patients jeunes pratiquant une activité sportive intense et régulière de sport de pivot/contact, et ne peuvent être extrapolés à tous les patients opérés d'une reconstruction chirurgicale du LCA. En effet, nous avons fait le choix de critères d'inclusion stricts sur la pratique du patient d'un sport pivot/contact en compétition, afin de cibler les patients les plus à risque de récurrence de rupture du LCA ou de nouvelles blessures du LCA ou du genou après reconstruction chirurgicale du LCA. Nous avons seulement inclus des sportifs adultes pratiquant un sport de pivot/contact. L'enfant sportif et le sportif de plus de 40 ans présentent, pour la reprise du sport, d'autres enjeux et donc des objectifs spécifiques différents nécessitant d'autres études.

Nos différentes études comportaient un faible effectif de patients. Les critères d'inclusion stricts pouvaient être une explication, mais les perdus de vue en sont une autre. Dans cette population de sujets, les jeunes actifs quittent facilement le réseau médical quand leur santé ne présente plus une limite à leurs activités. Ce faible effectif ne nous a pas permis de réaliser des analyses en sous-groupes (hommes vs. femmes, par type de blessures, par niveau de récupération fonctionnelle...), ce qui nous aurait permis de donner plus d'information pour individualiser la reprise du sport.

Au niveau méthodologie, il existe également des limites dans la passation des Hop Test. En effet, même si ces tests sont bien étudiés et considérés comme d'une bonne reproductibilité (Reid et al., 2007), il existe plusieurs positions de bras lors de la réalisation du Single Hop Test : bras libres (Munro and Herrington, 2011), bras croisés dans le dos (Petschnig et al., 1998) ou bras croisé sur les épaules comme dans nos études, position rassurante pour le patient. Une étude comparative de ces 3 modes permettrait de savoir si la position des bras a un rôle sur la symétrie et la performance des évaluations réalisées par les patients ayant subi une reconstruction chirurgicale du LCA.

Les valeurs des critères de LSI des variables issues des évaluations sont également une limite, car souvent décrites de façon arbitraire dans la littérature. En particulier pour les Hop Tests, il est retrouvé de nombreuses valeurs du LSI en fonction des étapes du continuum du retour au sport. La clarification de la méthodologie de passation des Hop Tests, ainsi que la définition récente des différentes étapes du retour au sport pourrait permettre de définir et d'objectiver ces derniers.

Nous avons également souligné dans ce travail les limites d'utiliser le LSI (Limb Symmetry Index) communément utilisé pour la décision de la reprise du sport. L'utilisation d'un indice d'asymétrie, comme l'Asymmetry Index, serait plus pertinent car il limiterait l'influence du déconditionnement du membre controlatéral dans les valeurs mesurées, mais son utilisation nécessiterait la définition de nouveaux critères objectifs pour toutes les batteries de tests classiquement utilisées. Face aux critères basés sur le LSI, ces nouveaux critères devraient également montrer leur supériorité dans la prévention de nouvelles blessures et le retour au sport. Ainsi, même s'il nous semble plus pertinent d'utiliser l'Asymmetry Index, nous avons décidé de garder dans la présentation de nos résultats les LSI, afin de pouvoir comparer plus facilement nos résultats avec d'autres études.

4.3 PERSPECTIVES

Ce travail amène à un certain nombre de perspectives.

La première perspective de ce travail de thèse est la poursuite de l'étude CR'STAL, afin d'augmenter les patients inclus dans l'étude pour atteindre un nombre suffisant afin de réaliser les analyses statistiques envisagées. Un des moyens serait l'extension de cette étude mono-centrique à d'autres centres d'inclusion. Cela permettrait une analyse plus fine des paramètres biomécaniques ainsi qu'une analyse en sous-groupe, notamment pour les blessures survenues dans les 2 ans après la chirurgie du LCA (hommes/femmes, blessure avec ou sans contacts, lors d'entraînements, de matchs ou autres, en fonction du siège de la blessure, blessure musculo-tendineuse ou articulaire...). La poursuite d'inclusion pourrait également permettre de mieux comprendre si les paramètres biomécaniques sont influencés par le type de sport pratiqué, le volume d'entraînement, et le niveau de pratique de compétition.

Avec un groupe plus nombreux de patients présentant une nouvelle blessure du LCA, une valeur de raideur biomécanique du membre opéré, ou un indice d'asymétrie, pourrait être défini afin de catégoriser certains patients comme à risque de blessure. L'analyse des autres paramètres issus de la batterie classique de tests permettrait aussi d'affiner les critères de retour au sport pivot/contact, et proposant une combinaison de critères. Des analyses statistiques type « fouille de données » ou « data mining » pourraient permettre par exemple d'améliorer et de définir des caractéristiques de patients à risque de blessures, et donc des critères de retour au sport

pivot/contact plus performants. Elles pourraient permettre de définir quelles sont les variables les plus importantes pour la reprise du sport, permettant de réduire le temps de passations et donc augmentant la faisabilité de ce projet.

Les critères issus de ces variables pourraient être des LSIs comme classiquement rapportés, mais également des valeurs brutes normalisées (à la masse, à la taille, en fonction H/F, en fonction du sport ou du niveau de pratique). D'autres analyses statistiques pourraient également fournir des informations précieuses sur comment se fait la récupération fonctionnelle et si des déficits perdurent dans le temps. Ces analyses spatio-temporelles, comme par exemple les SPM (Statistical Parametric Mapping (Pataky, 2010)) permettraient de définir qualitativement la différence entre le membre sain et le membre opéré comme dans l'étude Sole et *al.* (Sole et *al.*, 2017).

Des analyses macroscopiques, réalisées par la comparaison entre le membre sain et le membre opéré, pourraient également faire le lien entre les paramètres biomécaniques des patients ayant une nouvelle blessure du LCA, et les paramètres de force musculaire, de laxité ligamentaire, ou fonctionnels. Elles pourraient alors être affinées par les analyses SPM, complétant l'analyse macroscopique réalisée dans ce travail et permettrait de mieux comprendre les adaptations biomécaniques observées. De nouveaux axes rééducatifs ciblés pourraient alors être définis afin que la reprise du sport se fasse de façon optimale.

Il est à noter que des évaluations n'ont pu être menées à bien, comme la réalisation de sprint sur tapis roulant instrumentalisé. Ces dernières permettraient de définir le profil force/vitesse des patients à 6 mois, et permettraient de mieux comprendre les récupérations et déficits fonctionnels des patients opérés du LCA. Nous avons parlé dans ce travail de thèse seulement des évaluations à 6 mois postopératoires, alors que des évaluations ont été également réalisées à 9 mois et 12 mois postopératoires. Les analyses de ces deux autres temps permettraient de mieux définir la cinématique de récupération fonctionnelle des patients, et également l'intérêt ou non de faire reprendre les sports de pivot/contact à 9 mois comme Grindem et *al.* le suggèrent (Grindem et *al.*, 2016).

Enfin, le paramètre de raideur biomécanique du membre inférieur semble être un paramètre intéressant pour le suivi des patients après reconstruction chirurgicale du LCA. Son calcul simple grâce à la mesure du temps de contact et temps de vol lors d'une course sur tapis roulant ouvre des perspectives cliniques très intéressantes. Grâce à des outils peu coûteux, comme une barrière optométrie ou simplement un smartphone associé à un tapis roulant, la mesure de ce paramètre est possible. Cela laisse donc envisager la possibilité de réaliser une étude multicentrique de

monitoring pendant la phase de reprise de la course à pied des patients opérés afin de confirmer ces résultats et d'affiner les critères pour guider la reprise de la course à pied. De plus, l'évaluation de la raideur biomécanique semble complémentaire à celle réalisée par les Hop Tests, et permettrait un retour au sport individualisé et optimisé en fonction des capacités fonctionnelles du patient.

La mesure de raideur biomécanique, permettant d'objectiver l'adaptions asymétrique du membre inférieur à la course à pied, serait intéressante à étudier chez les patients avec une rupture du LCA non-opérés, mais aussi plus largement dans d'autres types de chirurgie du genou (ménisectomie, arthroscopie exploratrice), d'autres blessures liées au sport (entorse médiale ou latérale du genou, entorse latérale de la cheville), ou blessures rencontrées fréquemment chez le coureur à pied (syndrome fémoro-patellaire, tendinopathie du moyen fessier, du tendon rotulien ou du TFL par exemple).

4.4 CONCLUSIONS

Ce travail de thèse rapporte un certain nombre de données sur la course à pied et le retour au sport après reconstruction chirurgicale du LCA. Ce travail s'est traduit par une scoping review, une étude de suivi de patient pendant la phase de rééducation, et par la mise en place d'une étude prospective de suivi de cohorte lors de la reprise du sport pivot/contact avec des résultats préliminaires sur une cohorte de faibles effectifs. Ce travail a permis de mieux définir les paramètres à prendre en compte dans les critères de reprise de la course à pied après chirurgie du LCA, et d'en envisager certains. Il a aussi permis de montrer l'intérêt de l'évaluation biomécanique de la course à pied dans la décision de retour au sport pivot/contact.

À la lumière de nos travaux, en prenant en compte la variabilité inter-individuelle de la récupération fonctionnelle, l'autorisation de la reprise de la course à pied ne devrait pas se prendre uniquement grâce aux délais postopératoires, mais bien en prenant compte de la récupération du genou et la récupération fonctionnelle des membres inférieurs. Une décision individualisée patient par patient passe donc par une évaluation précise du genou et du membre inférieur au cours de la rééducation. L'objectif est de s'assurer d'une récupération fonctionnelle optimale, et d'évaluer les capacités du genou à subir les contraintes importantes liées à l'activité de course à pied, activité essentielle dans l'ensemble des activités sportives. Ainsi l'utilisation de Hop Tests et de la raideur des membres inférieurs permettrait cette individualisation de la décision de retour à la course à pied.

L'évaluation de la course à pied et de ses paramètres biomécaniques à 6 mois postopératoires pourrait, à son tour, améliorer la décision de retour au sport. En effet, cette évaluation permet de mettre en évidence des adaptations biomécaniques du membre inférieur lors de la course à pied, objectivées principalement dans notre travail par l'asymétrie de la raideur biomécanique du membre inférieur. Chez les personnes ayant eu une nouvelle blessure du LCA (opéré ou controlatéral) dans les deux ans après une reconstruction chirurgicale du LCA, il existait une asymétrie du paramètre de raideur biomécanique plus importante que chez les patients sans nouvelle blessure. Ces résultats vont dans le sens que ce paramètre serait pertinent pour orienter la reprise du sport et pourrait réduire le risque de nouvelle blessure du genou.

Tous ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives en pratiques cliniques. Premièrement, nos travaux soulignent l'intérêt de l'utilisation de tests fonctionnels à partir du 3^{ème} mois

postopératoire pour aider la décision de la reprise de la course à pied. Deuxièmement, nos résultats soutiennent l'intérêt de l'utilisation de l'évaluation de la raideur biomécanique des membres inférieurs en course à pied dans la batterie de test permettant l'autorisation de la reprise du sport pivot/contact. Ainsi, tous nos travaux concluent sur l'importance d'individualiser la décision de la reprise de la course à pied puis du sport pendant les étapes de ce continuum.

Bibliographie

- Abrams, G. D., Harris, J. D., Gupta, A. K., McCormick, F. M., Bush-Joseph, C. A., Verma, N. N., et al. (2014). Functional performance testing after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *Orthop. J. Sports Med.* 2, 2325967113518305.
- Adams, D., Logerstedt, D. S., Hunter-Giordano, A., Axe, M. J., and Snyder-Mackler, L. (2012). Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 42, 601–14.
- Amano, K., Huebner, J. L., Stabler, T. V., Tanaka, M., McCulloch, C. E., Lobach, I., et al. (2018). Synovial fluid profile at the time of anterior cruciate ligament reconstruction and its association with cartilage matrix composition 3 years after surgery. *Am. J. Sports Med.* 46, 890–899.
- Ammann, R., Taube, W., and Wyss, T. (2016). Accuracy of PARTwear inertial sensor and optojump optical measurement system for measuring ground contact time during running. *J. Strength Cond. Res.* 30, 2057–2063.
- An, W., Rainbow, M. J., and Cheung, R. T. H. (2015). Effects of surface inclination on the vertical loading rates and landing pattern during the first attempt of barefoot running in habitual shod runners. *BioMed Res. Int.* 2015, 240153.
- Andriacchi, T. P., Mündermann, A., Smith, R. L., Alexander, E. J., Dyrby, C. O., and Koo, S. (2004). A framework for the in vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee. *Ann. Biomed. Eng.* 32, 447–457.
- Ankri, M., Goncalves, H., and Wajsfisz, A. (2016). Étude du rôle des différentes structures du point d'angle postéro-latéral dans la stabilité rotatoire du genou. *Rev. Chir. Orthopédique Traumatol.* 102, S287–S288.
- Ardern, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., and Feller, J. A. (2010). Hamstring strength recovery after hamstring tendon harvest for anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between graft types. *Arthroscopy* 26, 462–469.
- Ardern, C.L., Webster K.E., Taylor N.F., and Feller J.A. (2011). Return to the preinjury level of competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: two-thirds of patients have not returned by 12 months after surgery. *Am. J. Sports Med.* 39, 538–43.
- Ardern C.L., Taylor N.F., Feller J.A., and 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. *Br. J. Sports Med.* 48, 1543–52.

- Arderm C.L., Taylor N.F., Feller J.A., Whitehead T.S., and Webster K.E. (2015). Sports participation 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes who had not returned to sport at 1 year: a prospective follow-up of physical function and psychological factors in 122 athletes. *Am. J. Sports Med.* 43, 848–56.
- Arderm, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., et al. (2016). 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br. J. Sports Med.* 50, 853–864.
- Arksey, H., and O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *Int J Soc Res Methodol* 8, 19–32.
- Årøen, A., Løken, S., Heir, S., Alvik, E., Ekeland, A., Granlund, O. G., et al. (2004). Articular cartilage lesions in 993 consecutive knee arthroscopies. *Am. J. Sports Med.* 32, 211–215.
- ATIH (2016). Dénombrement de l'activité nationale MCO. Available at: https://www.atih.sante.fr/sites/default/files/.../denombrement_variables_mco_2016.xlsx.
- B**alsalobre-Fernández, C., Agopyan, H., and Morin, J.-B. (2017). The validity and reliability of an iPhone app for measuring running mechanics. *J. Appl. Biomech.* 33, 222–226.
- Barber, S. D., Noyes, F. R., Mangine, R. E., McCloskey, J. W., and Hartman, W. (1990). Quantitative assessment of functional limitations in normal and anterior cruciate ligament-deficient knees. *Clin. Orthop.*, 204–214.
- Barber, S. D., Noyes, F. R., Mangine, R., and DeMaio, M. (1992). Rehabilitation after ACL reconstruction: Function testing. *Orthopedics* 15, 969–974.
- Barber-Westin, S. D., and Noyes, F. R. (2011a). Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc.* 27, 1697–1705.
- Barber-Westin, S. D., and Noyes, F. R. (2011b). Objective criteria for return to athletics after anterior cruciate ligament reconstruction and subsequent reinjury rates: a systematic review. *Phys. Sportsmed.* 39, 100–110.
- Benedetti, M. G., Bonato, P., Catani, F., D'Alessio, T., Knaflitz, M., Marcacci, M., et al. (1999). Myoelectric activation pattern during gait in total knee replacement: relationship with kinematics, kinetics, and clinical outcome. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.* 7, 140–149.
- Berchuck, M., Andriacchi, T. P., Bach, B. R., and Reider, B. (1990). Gait adaptations by patients who have a deficient anterior cruciate ligament. *J. Bone Joint Surg. Am.* 72, 871–877.
- Besier, T. F., Lloyd, D. G., Cochrane, J. L., and Ackland, T. R. (2001). External loading of the knee joint during running and cutting maneuvers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33, 1168–1175.
- Biau, D., Tournoux, C., Katsahian, S., Schranz, P., and Nizard (2006). Bone-patellar tendon-bone autografts versus hamstring autografts for reconstruction of anterior cruciate ligament: meta-analysis. *BMJ* 332, 995–1001.

- Blanch, P., and Gabbett, T. J. (2016). Has the athlete trained enough to return to play safely? The acute:chronic workload ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury. *Br J Sports Med* 50, 471–475.
- Błażkiewicz, M., Wiszomirska, I., and Wit, A. (2014). Comparison of four methods of calculating the symmetry of spatial-temporal parameters of gait. *Acta Bioeng. Biomech.* 16, 29–35.
- Bohu, Y., Klouche, S., Lefevre, N., Webster, K., and Herman, S. (2014). Translation, cross-cultural adaptation and validation of the French version of the Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) scale. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*
- Bottoni, C. R., Smith, E. L., Shaha, J., Shaha, S. S., Raybin, S. G., Tokish, J. M., et al. (2015). Autograft versus allograft anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective, randomized clinical study with a minimum 10-year follow-up. *Am. J. Sports Med.* 43, 2501–2509.
- Bouchet, T. (2012). “Chapitre 17 - Particularité de la chirurgie du LCA «ancien»: l'impact des lésions ménisco-cartilagineuses,” in *Le ligament croisé antérieur: de la rupture à l'arthrose*, eds. J. Rodineau and S. Besch (Paris: Elsevier Masson), 187–197.
- Bowersock, C. D., Willy, R. W., DeVita, P., and Willson, J. D. (2017). Reduced step length reduces knee joint contact forces during running following anterior cruciate ligament reconstruction but does not alter inter-limb asymmetry. *Clin. Biomech.* 43, 79–85.
- Brophy, R. H., Schmitz, L., Wright, R. W., Dunn, W. R., Parker, R. D., Andrich, J. T., et al. (2012). Return to play and future acl injury risk after acl reconstruction in soccer athletes from the Multicenter Orthopaedic Outcomes Network (MOON) Group. *Am. J. Sports Med.* 40, 2517–2522.
- Brughelli, M., Cronin, J., and Chaouachi, A. (2011). Effects of running velocity on running kinetics and kinematics. *J. Strength Cond. Res. Natl. Strength Cond. Assoc.* 25, 933–939.
- Butler, D. L., Noyes, F. R., and Grood, E. S. (1980). Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. *J. Bone Joint Surg. Am.* 62, 259–270.
- Button, K., van Deursen, R., and Price, P. (2006). Classification of functional recovery of anterior cruciate ligament copers, non-copers, and adapters. *Br. J. Sports Med.* 40, 853–858.
- C**antin, O., Lustig, S., Rongieras, F., Saragaglia, D., Lefèvre, N., Graveleau, N., et al. (2016). Devenir cartilagineux à 12ans de recul après reconstruction du ligament croisé antérieur. *Rev. Chir. Orthopédique Traumatol.* 102, 621–626.
- Capin, J. J., Zarzycki, R., Arundale, A., Cummer, K., and Snyder-Mackler, L. (2017). Report of the primary outcomes for gait mechanics in men of the ACL-Sports trial: secondary prevention with and without perturbation training does not restore gait symmetry in men 1 or 2 years after ACL reconstruction. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 475, 2513–2522.
- Cavanaugh, J. T., and Powers, M. (2017). ACL rehabilitation progression: where are we now? *Curr. Rev. Musculoskelet. Med.* 10, 289–296.

- Chandrashekar, N., Slauterbeck, J., and Hashemi, J. (2005). Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: a cadaveric study. *Am. J. Sports Med.* 33, 1492–1498.
- Chandrashekar, N., Mansouri, H., Slauterbeck, J., and Hashemi, J. (2006). Sex-based differences in the tensile properties of the human anterior cruciate ligament. *J. Biomech.* 39, 2943–2950.
- Chappell, J. D., Creighton, R. A., Giuliani, C., Yu, B., and Garrett, W. E. (2007). Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: risks for noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am. J. Sports Med.* 35, 235–241.
- Chmielewski, T. L., Myer, G. D., Kauffman, D., and Tillman, S. M. (2006). Plyometric exercise in the rehabilitation of athletes: physiological responses and clinical application. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 36, 308–319.
- Chmielewski, T. L., George, S. Z., Tillman, S. M., Moser, M. W., Lentz, T. A., Indelicato, P. A., et al. (2016). Low- versus high-intensity plyometric exercise during rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am. J. Sports Med.* 44, 609–617.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates.
- Collette, M., Courville, J., Forton, M., and Gagnière, B. (2012). Objective evaluation of anterior knee laxity; comparison of the KT-1000 and GNRB® arthrometers. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 20, 2233–2238.
- Colquhoun, H. L., Levac, D., O'Brien, K. K., Straus, S., Tricco, A. C., and Perrier, L. (2014). Scoping reviews: time for clarity in definition, methods, and reporting. *J Clin Epidemiol* 67, 1291–1294.
- Culvenor, A., and Barton, C. (2017). It is time to stop wasting time and money debating graft types and surgical approaches for ACL injuries: The secret probably lies in optimising rehabilitation - *BJSM Blog - Soc. Medias Lead. SEM Voice*. Available at: <http://blogs.bmj.com/bjasm/2017/09/20/time-stop-wasting-time-money-debating-graft-types-surgical-approaches-acl-injuries-secret-probably-lies-optimising-rehabilitation/> [Accessed May 2, 2018].
- Cupido, C., Peterson, D., Sutherland, M. S., Ayeni, O., and Stratford, P. W. (2014). Tracking Patient Outcomes after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Physiother. Can.* 66, 199–205.

De Valk, E. J., Moen, M. H., Winters, M., Bakker, E. W. P., Tamminga, R., and Van Der Hoeven, H. (2013). Preoperative patient and injury factors of successful rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction with single-bundle techniques. *Arthrosc.* 29, 1879–1895.

- Décary, S., Fallaha, M., Belzile, S., Martel-Pelletier, J., Pelletier, J.-P., Feldman, D., et al. (2018). Clinical diagnosis of partial or complete anterior cruciate ligament tears using patients' history elements and physical examination tests. *Plos one* 13, e0198797.
- Deveci, A., Cankaya, D., Yilmaz, S., Özdemir, G., Arslantaş, E., & Bozkurt, M. (2015). The arthroscopical and radiological corelation of lever sign test for the diagnosis of anterior cruciate ligament rupture. *SpringerPlus*, 4,830. doi.org/10.1186/s40064-015-1628-9
- Di Stasi, S. L., Logerstedt, D., Gardinier, E. S., and Snyder-Mackler, L. (2013). Gait patterns differ between ACL-reconstructed athletes who pass return-to-sport criteria and those who fail. *Am. J. Sports Med.* 41, 1310–1318. doi:10.1177/0363546513482718.
- Drogset, J. O., and Grøntvedt, T. (2002). Anterior cruciate ligament reconstruction with and without a ligament augmentation device results at 8-year follow-up. *Am. J. Sports Med.* 30, 851–856.
- Dufour, M., and Pillu, M. (2007). *Biomécanique fonctionnelle: Membres-Tête-Tronc*. Ed Masson.
- Duquette, A. M., and Andrews, D. M. (2010). Comparing methods of quantifying tibial acceleration slope. *J. Appl. Biomech.* 26, 229–233.
- Dye, S. F. (1996). The knee as a biologic transmission with an envelope of function: a theory. *Clin. Orthop.* 325, 10–18.
- Dyhre-Poulsen, P., and Krogsgaard, M. R. (2000). Muscular reflexes elicited by electrical stimulation of the anterior cruciate ligament in humans. *J. Appl. Physiol.* 89, 2191–2195.

Ebert, J. R., Edwards, P., Yi, L., Joss, B., Ackland, T., Carey-Smith, R., et al. (2017). Strength and functional symmetry is associated with post-operative rehabilitation in patients following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 26, 2353-2361.

Ebrahimzadeh, M. H., Makhmalbaf, H., Golhasani-Keshtan, F., Rabani, S., and Birjandinejad, A. (2015). The International Knee Documentation Committee (IKDC) Subjective Short Form: a validity and reliability study. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 23, 3163–3167.

Ehkirch, F.-P. (2012). “Chapitre 16 - LCA et re-ruptures : quelles stratégies ?” in *Le ligament croisé antérieur: de la rupture à l'arthrose*, eds. J. Rodineau and S. Besch (Paris: Elsevier Masson), 179–185.

Escamilla, R. F., Macleod, T. D., Wilk, K. E., Paulos, L., and Andrews, J. R. (2012). Anterior cruciate ligament strain and tensile forces for weight-bearing and non-weight-bearing exercises: a guide to exercise selection. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 42, 208–220.

Fitzgerald, G. K., Axe, M. J., and Snyder-Mackler, L. (2000). A decision-making scheme for returning patients to high-level activity with nonoperative treatment after anterior cruciate ligament rupture. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 8, 76–82.

- Fitzgerald, G. K., Lephart, S. M., Hwang, J. H., and Wainner, R. S. (2001). Hop tests as predictors of dynamic knee stability. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 31, 588–597.
- Flanigan, D. C., Everhart, J. S., Pedroza, A., Smith, T., and Kaeding, C. C. (2013). Fear of reinjury (Kinesiophobia) and persistent knee symptoms are common factors for lack of return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc.* 29, 1322–1329.
- Francis, A., Thomas, R. W. M., and McGregor, A. (2001). Anterior cruciate ligament rupture: Reconstruction surgery and rehabilitation. A nation-wide survey of current practice. *Knee* 8, 13–18.
- Frobell, R. B., Roos, E. M., Roos, H. P., Ranstam, J., and Lohmander, L. S. (2010). A randomized trial of treatment for acute anterior cruciate ligament tears. *N. Engl. J. Med.* 363, 331–342.
- Fung, D. T., and Zhang, L.-Q. (2003). Modeling of ACL impingement against the intercondylar notch. *Clin. Biomech. Bristol Avon* 18, 933–941.
- G**abbett, T. J. (2016). The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br. J. Sports Med.* 50, 273–280.
- Gazendam, M. G. J., and Hof, A. L. (2007). Averaged EMG profiles in jogging and running at different speeds. *Gait Posture* 25, 604–614.
- Giandolini, M., Arnal, P. J., Millet, G. Y., Peyrot, N., Samozino, P., Dubois, B., et al. (2013a). Impact reduction during running: efficiency of simple acute interventions in recreational runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113, 599–609.
- Giandolini, M., Horvais, N., Farges, Y., Samozino, P., and Morin, J.-B. (2013b). Impact reduction through long-term intervention in recreational runners: midfoot strike pattern versus low-drop/low-heel height footwear. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113, 2077–2090.
- Gifstad, T., Sole, A., Strand, T., Uppheim, G., Grøntvedt, T., and Drogset, J. O. (2013). Long-term follow-up of patellar tendon grafts or hamstring tendon grafts in endoscopic ACL reconstructions. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 21, 576–583.
- Gobbi, A., and Francisco, R. (2006). Factors affecting return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon and hamstring graft: a prospective clinical investigation. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 14, 1021–1028.
- Gokeler, A., Welling, W., Zaffagnini, S., Seil, R., and Padua, D. (2017). Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 25, 192–199.
- Gribble, P. A., Hertel, J., and Plisky, P. (2012). Using the Star Excursion Balance Test to Assess Dynamic Postural-Control Deficits and Outcomes in Lower Extremity Injury: A Literature and Systematic Review. *J. Athl. Train.* 47, 339–357.
- Grindem, H., Snyder-Mackler, L., Moksnes, H., Engebretsen, L., and Risberg, M. A. (2016). Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br. J. Sports Med.*, 50, 804–808.

Gupta, R., Kapoor, D., Kapoor, L., Malhotra, A., Masih, G. D., Kapoor, A., et al. (2016). Immediate post-operative pain in anterior cruciate ligament reconstruction surgery with bone patellar tendon bone graft versus hamstring graft. *J. Orthop. Surg.* 11, 67.

Harput G., Kilinc HE., Ozer H., Baltaci G., and Mattacola CG. (2015). Quadriceps and hamstring strength recovery during early neuromuscular rehabilitation after ACL hamstring-tendon autograft reconstruction. *J. Sport Rehabil.* 24, 398–404.

HAS (2008a). Critères de suivi en rééducation et d'orientation en ambulatoire ou en SSR Après ligamentoplastie du croisé antérieur du genou.

HAS (2008b). Prise en charge thérapeutique des lésions méniscales et des lésions isolées du ligament croisé antérieur du genou chez l'adulte.

Hashemi, J., Chandrashekar, N., Mansouri, H., Slauterbeck, J. R., and Hardy, D. M. (2008). The human anterior cruciate ligament: Sex differences in ultrastructure and correlation with biomechanical properties. *J. Orthop. Res.* 26, 945–950.

Heijne, A., Fleming, B. C., Renstrom, P. A., Peura, G. D., Beynnon, B. D., and Werner, S. (2004). Strain on the anterior cruciate ligament during closed kinetic chain exercises. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36, 935–941.

Henning, C. E., Lynch, M. A., and Glick, K. R. (1985). An in vivo strain gage study of elongation of the anterior cruciate ligament. *Am. J. Sports Med.* 13, 22–26.

Hootman, J. M., Dick, R., and Agel, J. (2007). Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *J. Athl. Train.* 42, 311–319.

Hopkins, W. G. (2018). A New View of Statistics. *New View Stat.* Available at: <https://www.sportsci.org/resource/stats/index.html> [Accessed September 30, 2018].

Hopper, D. M., Goh, S. C., Wentworth, L. A., Chan, D. Y. K., Chau, J. H. W., Wootton, G. J., et al. (2002). Test-retest reliability of knee rating scales and functional hop tests one year following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys. Ther. Sport* 3, 10–18.

Hopper, D. M., Strauss, G. R., Boyle, J. J., and Bell, J. (2008). Functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction: a longitudinal perspective. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 89, 1535–1541.

Hsu, C.-J., George, S. Z., and Chmielewski, T. L. (2016). Association of quadriceps strength and psychosocial factors with single-leg hop performance in patients with meniscectomy. *Orthop. J. Sports Med.* 4, 2325967116676078.

Hughes, G., and Watkins, J. (2006). A Risk-Factor Model for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Sports Med.* 36, 411–428.

Jones, K. G. (1963). Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament. *J. Bone Jt. Surg.* 45, 925–932.

- K**aeding, C. C., Pedroza, A. D., Reinke, E. K., Huston, L. J., Consortium, M., Spindler, K. P., et al. (2015). Risk factors and predictors of subsequent ACL injury in either knee after ACL reconstruction prospective analysis of 2488 primary ACL reconstructions from the MOON Cohort. *Am. J. Sports Med.* 43, 1583–1590.
- Kaplan, Y. (2015). Identifying individuals with an anterior cruciate ligament deficient knee as copers and non-copers: A narrative literature review. *J. Sci. Med. Sport* 19, e26.
- Karanikas, K., Arampatzis, A., and Brüggemann, G.-P. (2009). Motor task and muscle strength followed different adaptation patterns after anterior cruciate ligament reconstruction. *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* 45, 37–45.
- Kegerreis, S. (1983). The construction and implementation of functional progressions as a component of athletic rehabilitation. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 5, 14–19.
- Kessler, M. A., Behrend, H., Henz, S., Stutz, G., Rukavina, A., and Kuster, M. S. (2008). Function, osteoarthritis and activity after ACL-rupture: 11 Years follow-up results of conservative versus reconstructive treatment. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 16, 442–448.
- Kim, S., Bosque, J., Meehan, J. P., Jamali, A., and Marder, R. (2011). Increase in outpatient knee arthroscopy in the United States: a comparison of National Surveys of Ambulatory Surgery, 1996 and 2006. *J. Bone Joint Surg. Am.* 93, 994–1000.
- Ko, M. S., Yang, S. J., Ha, J. K., Choi, J. Y., and Kim, J. G. (2012). Correlation between Hamstring Flexor Power Restoration and Functional Performance Test: 2-Year Follow-Up after ACL Reconstruction Using Hamstring Autograft. *Knee Surg. Relat. Res.* 24, 113–119.
- Kulmala, J.-P., Avela, J., Pasanen, K., and Parkkari, J. (2013). Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers: *Med. Sci. Sports Exerc.* 45, 2306–2313.
- Kutzner, I., Heinlein, B., Graichen, F., Rohlmann, A., Halder, A. M., Beier, A., et al. (2012). Loading of the knee joint during ergometer cycling: telemetric in vivo data. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 42, 1032–1038.
- Kyritsis, P., Bahr, R., Landreau, P., Miladi, R., and 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. *Br. J. Sports Med.* 50, 946-951.
- L**aboute, E., Savalli, L., Puig, P., Trouve, P., Sabot, G., Monnier, G., et al. (2010). Analysis of return to competition and repeat rupture for 298 anterior cruciate ligament reconstructions with patellar or hamstring tendon autograft in sportspeople. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 53, 598–614.
- Lacouture, P., Colloud, F., Decatoire, A., and Monnet, T. (2013). Étude biomécanique de la course à pied. 23. *EMC- Podologie.* 27-140-A-52

- LaPrade, R. F., Engebretsen, A. H., Ly, T. V., Johansen, S., Wentorf, F. A., and Engebretsen, L. (2007). The anatomy of the medial part of the knee. *J. Bone Joint Surg. Am.* 89, 2000–2010.
- Lepley, L. K., and Palmieri-Smith, R. M. (2016). Pre-operative quadriceps activation is related to post-operative activation, not strength, in patients post-ACL reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 24, 236–246.
- Lepley LK. (2015). Deficits in quadriceps strength and patient-oriented outcomes at return to activity after ACL reconstruction: a review of the current literature. *Sports Health.* 7, 231–8.
- Li, S., Chen, Y., Lin, Z., Cui, W., Zhao, J., and Su, W. (2012). A systematic review of randomized controlled clinical trials comparing hamstring autografts versus bone-patellar tendon-bone autografts for the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 132, 1287–1297.
- Li, S., Su, W., Zhao, J., Xu, Y., Bo, Z., Ding, X., et al. (2011). A meta-analysis of hamstring autografts versus bone-patellar tendon-bone autografts for reconstruction of the anterior cruciate ligament. *The Knee* 18, 287–293.
- Lichtenberg, M. C., Koster, C. H., Teunissen, L. P.J., Oosterveld, F. G.J., Harmsen, A. M.K., et al. (2018). Does the Lever Sign Test Have Added Value for Diagnosing Anterior Cruciate Ligament Ruptures? *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 3, 1-7 doi:10.1177/2325967118759631.
- Lipscomb, A. B., Johnston, R. K., Snyder, R. B., Warburton, M. J., and Gilbert, P. P. (1982). Evaluation of hamstring strength following use of semitendinosus and gracilis tendons to reconstruct the anterior cruciate ligament. *Am. J. Sports Med.* 10, 340–342.
- Logerstedt, D., Grindem, H., Lynch, A., Eitzen, I., Engebretsen, L., Risberg, M. A., et al. (2012). Single-legged hop tests as predictors of self-reported knee function after anterior cruciate ligament reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Am. J. Sports Med.* 40, 2348–2356.
- Logerstedt, D. S. (2010). Knee Stability and Movement Coordination Impairments: Knee Ligament Sprain. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 40, A1-A37.
- Lohmander, L. S., Ostberg, A., Englund, M., and Roos, H. (2004). High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Rheum.* 50, 3145–3152.
- Lutz, G. E., Palmitier, R. A., An, K. N., and Chao, E. Y. S. (1993). Comparison of Tibiofemoral Joint Forces during Open-Kinetic-Chain and Closed-Kinetic-Chain Exercises. *JBJS* 75, 732-739.
- Lynch, A. D., Logerstedt, D. S., Grindem, H., Eitzen, I., Hicks, G. E., Axe, M. J., et al. (2013). Consensus criteria for defining “successful outcome” after ACL injury and reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort investigation. *Br. J. Sports Med.* 49, 335-342.
- Lysholm, J., and Tegner, Y. (2007). Knee injury rating scales. *Acta Orthop.* 78, 445–453.

- MacLeod, T. D., Snyder-Mackler, L., and Buchanan, T. S. (2014). Differences in neuromuscular control and quadriceps morphology between potential copers and noncopers following anterior cruciate ligament injury. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 44, 76–84.
- Manunta, A. F., Zedde, P., Pisanu, F., and Marras, F. (2014). Sports-related changes of the synovial membrane. *Joints* 2, 181–187.
- Markatos, K., Kaseta, M. K., Lалlos, S. N., Korres, D. S., and Efstathopoulos, N. (2013). The anatomy of the ACL and its importance in ACL reconstruction. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol. Orthop. Traumatol.* 23, 747–752.
- Marx, R. G., Stump, T. J., Jones, E. C., Wickiewicz, T. L., and Warren, R. F. (2001). Development and evaluation of an activity rating scale for disorders of the knee. *Am. J. Sports Med.* 29, 213–218.
- Massey, P. A., Harris, J. D., Winston, L. A., Lintner, D. M., Delgado, D. A., & McCulloch, P. C. (2017). Critical Analysis of the Lever Test for Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Insufficiency. *Arthroscopy* 33, 1560–1566.
- Mazet, A., Morin, J.-B., Semay, B., Philippot, R., and Edouard, P. (2016). Modifications du pattern mécanique de course dans les suites d’une plastie du ligament croisé antérieur. *Sci. Sports* 31, 219–222.
- McGrath, T. M., Waddington, G., Scarvell, J. M., Ball, N. B., Creer, R., Woods, K., et al. (2016). The effect of limb dominance on lower limb functional performance – a systematic review. *J. Sports Sci.* 34, 289–302.
- McNitt-Gray, J. L. (1993). Kinetics of the lower extremities during drop landings from three heights. *J. Biomech.* 26, 1037–1046.
- Micheo, W., Hernández, L., and Seda, C. (2010). Evaluation, management, rehabilitation, and prevention of anterior cruciate ligament injury: current concepts. *PM R* 2, 935–944.
- Moloney, C., O’Sullivan, K., O’Farrell, D., Louw, Q., and Clifford, A. M. (2014). Hamstring muscle strength before and after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. *Isokinet. Exerc. Sci.* 22, 225–236.
- Montalvo, A. M., Schneider, D. K., Yut, L., Webster, K. E., Beynon, B., Kocher, M. S., et al. (2018). “What’s my risk of sustaining an ACL injury while playing sports?” A systematic review with meta-analysis. *Br. J. Sports Med.*
- Morin, J. B., Dalleau, G., Kyröläinen, H., Jeannin, T., and Belli, A. (2005). A simple method for measuring stiffness during running. *J. Appl. Biomech.* 21, 167–180.
- Morin, J. B., Samozino, P., Zameziati, K., and Belli, A. (2007). Effects of altered stride frequency and contact time on leg-spring behavior in human running. *J. Biomech.* 40, 3341–3348.
- Morin, J.-B., Samozino, P., Féasson, L., Geysant, A., and Millet, G. (2009). Effects of muscular biopsies on the mechanics of running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 105, 185–190.

- Morin, J.-B., and Samozino, P. (2018). *Biomechanics of Training and Testing: Innovative Concepts and Simple Field Methods.* , eds. J.-B. Morin and P. Samozino. Springer
- Morris, R. C., Hulstyn, M. J., Fleming, B. C., Owens, B. D., and Fadale, P. D. (2016). Return to play following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin. Sports Med.* 35, 655–668.
- Moses, B., Orchard, J., and Orchard, J. (2012). Systematic Review: Annual Incidence of ACL Injury and Surgery in Various Populations. *Res. Sports Med.* 20, 157–179.
- Munro, A. G., and Herrington, L. C. (2011). Between-session reliability of four hop tests and the agility t-test. *J. Strength Cond. Res.* 25, 1470.
- Murray, M. M., Vavken, P., and Fleming, B. (2013). *The ACL Handbook: Knee Biology, Mechanics, and Treatment.* New York: Springer-Verlag
- Myer, G. D., Paterno, M. V., Ford, K. R., Quatman, C. E., and Hewett, T. E. (2006). Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: criteria-based progression through the return-to-sport phase. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 36, 385–402.
- Myer, G. D., Schmitt, L. C., Brent, J. L., Ford, K. R., Barber Foss, K. D., Scherer, B. J., et al. (2011). Utilization of modified NFL combine testing to identify functional deficits in athletes following ACL reconstruction. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 41, 377–387.
- Myklebust, G., and Bahr, R. (2005). Return to play guidelines after anterior cruciate ligament surgery. *Br. J. Sports Med.* 39, 127–131.
- N**agelli, C., and Hewett, T. (2016). Should Return to Sport be Delayed Until 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? Biological and Functional Considerations. *Sports Med.* 47, 221-232.
- Newton, P. O., Woo, S. L., MacKenna, D. A., and Akeson, W. H. (1995). Immobilization of the knee joint alters the mechanical and ultrastructural properties of the rabbit anterior cruciate ligament. *J. Orthop. Res.* 13, 191–200.
- Nordenvall, R., Bahmanyar, S., Adami, J., Stenros, C., Wredmark, T., and Felländer-Tsai, L. (2012). A population-based nationwide study of cruciate ligament injury in Sweden, 2001-2009 incidence, treatment, and sex differences. *Am. J. Sports Med.* 40, 1808–1813.
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait Posture*, 7, 77-95.
- Noyes, F. R., Barber, S. D., and Mangine, R. E. (1991). Abnormal lower limb symmetry determined by function hop tests after anterior cruciate ligament rupture. *Am. J. Sports Med.* 19, 513–518.
- Noyes, F. R., and Barber-Westin, S. D. (2017). *Noyes' knee disorders: surgery, rehabilitation, clinical outcomes.* Elsevier.
- Noyes, F. R., and Grood, E. S. (1976). The strength of the anterior cruciate ligament in humans and Rhesus monkeys. *J. Bone Joint Surg. Am.* 58, 1074–1082.

Noyes, F. R., Torvik, P. J., Hyde, W. B., and DeLucas, J. L. (1974). Biomechanics of ligament failure. II. An analysis of immobilization, exercise, and reconditioning effects in primates. *J. Bone Joint Surg. Am.* 56, 1406–1418.

Nyland J., Mattocks A., Kibbe S., Kalloub A., Greene JW., and Caborn DN. (2016). Anterior cruciate ligament reconstruction, rehabilitation, and return to play: 2015 update. *Open Access J. Sports Med.* 7, 21–32.

Pairot de Fontenay, B., Argaud, S., Blache, Y., & Monteil, K. (2014). Motion alterations after anterior cruciate ligament reconstruction: comparison of the injured and uninjured lower limbs during a single-legged jump. *Journal of Athletic Training*, 49, 311–316.

Pairot de Fontenay, B., Argaud, S., Blache, Y., & Monteil, K. (2015). Contralateral limb deficit seven months after ACL-reconstruction: An analysis of single-leg hop tests. *The Knee.* 22,309-312.

Palmieri-Smith, R. M., Thomas, A. C., and Wojtys, E. M. (2008). Maximizing Quadriceps Strength After ACL Reconstruction. *Clin. Sports Med.* 27, 405–424.

Pamukoff, D. N., Montgomery, M. M., Choe, K. H., Moffit, T. J., Garcia, S. A., and Vakula, M. N. (2018). Bilateral Alterations in Running Mechanics and Quadriceps Function Following Unilateral Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* doi: 10.2519/jospt.2018.8170. [Epub ahead of print]

Pappas, P., Paradisis, G., Tsolakis, C., Smirniotou, A., and Morin, J.-B. (2014). Reliabilities of leg and vertical stiffness during treadmill running. *Sports Biomech.*, 13, 391–399.

Pappas, P., Paradisis, G., and Vagenas, G. (2015). Leg and vertical stiffness (a)symmetry between dominant and non-dominant legs in young male runners. *Hum. Mov. Sci.* 40, 273–283.

Parkkari, J., Pasanen, K., Mattila, V. M., Kannus, P., and Rimpelä, A. (2008). The risk for a cruciate ligament injury of the knee in adolescents and young adults: a population-based cohort study of 46 500 people with a 9 year follow-up. *Br. J. Sports Med.* 42, 422–426.

Pataky, T. C. (2010). Generalized n-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping. *J. Biomech.* 43, 1976–1982.

Paterno, M. V., Rauh, M. J., Schmitt, L. C., Ford, K. R., and Hewett, T. E. (2012). Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clin. J. Sport Med.* 22, 116–121.

Paterno, M. V., Rauh, M. J., Schmitt, L. C., Ford, K. R., and Hewett, T. E. (2014). Incidence of Second ACL Injuries 2 Years After Primary ACL Reconstruction and Return to Sport. *Am. J. Sports Med.* 42, 1567–1573.

Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., Huang, B., et al. (2010). Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am. J. Sports Med.* 38, 1968–1978.

- Patras, K., Ziogas, G., Ristanis, S., Tsepis, E., Stergiou, N., and Georgoulis, A. D. (2009). High intensity running results in an impaired neuromuscular response in ACL reconstructed individuals. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 17, 977–984.
- Patras, K., Ziogas, G., Ristanis, S., Tsepis, E., Stergiou, N., and Georgoulis, A. D. (2010). ACL reconstructed patients with a BPTB graft present an impaired vastus lateralis neuromuscular response during high intensity running. *J. Sci. Med. Sport Sports Med. Aust.* 13, 573–577.
- Perraton, L. G., Hall, M., Clark, R. A., Crossley, K. M., Pua, Y.-H., Whitehead, T. S., et al. (2018). Poor knee function after ACL reconstruction is associated with attenuated landing force and knee flexion moment during running. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 26, 391–398.
- Perttunen, J. O., Kyröläinen, H., Komi, P. V., and Heinonen, A. (2000). Biomechanical loading in the triple jump. *J. Sports Sci.* 18, 363–370.
- Petschnig, R., Baron, R., and Albrecht, M. (1998). The relationship between isokinetic quadriceps strength test and hop tests for distance and one-legged vertical jump test following anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 28, 23–31.
- Proffen, B., and Murray, M. (2013). Reinnervation and revascularization in engineered ACL healing. *The ACL Handbook*, 2013 – Springer
- Prodromos, C., Han, Y., Rogowski, J., Joyce, B., and Shi, K. (2007). A meta-analysis of the incidence of anterior cruciate ligament tears as a function of gender, sport, and a knee injury–reduction regimen. *Arthrosc.* 23, 1320–1325.

Quelard, B., Sonnery-Cottet, B., Zayni, R., Ogassawara, R., Prost, T., and Chambat, P. (2010). Preoperative factors correlating with prolonged range of motion deficit after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am. J. Sports Med.* 38, 2034–2039.

Reid, A., Birmingham, T. B., Stratford, P. W., Alcock, G. K., and Giffin, J. R. (2007). Hop testing provides a reliable and valid outcome measure during rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys. Ther.* 87, 337–349.

Relph, N., Herrington, L., and Tyson, S. (2014). The effects of ACL injury on knee proprioception: a meta-analysis. *Physiotherapy* 100, 187–195.

Renner, K. E., Franck, C. T., Miller, T. K., and Queen, R. M. (2018). Limb asymmetry during recovery from anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Orthop. Res. Off. Publ. Orthop. Res. Soc.* 36, 1887–1893.

Renstrom, P., Ljungqvist, A., Arendt, E., Beynon, B., Fukubayashi, T., Garrett, W., et al. (2008). Non-contact ACL injuries in female athletes: an international olympic committee current concepts statement. *Br. J. Sports Med.* 42, 394–412.

- Rice, D. A., and McNair, P. J. (2010). Quadriceps arthrogenic muscle inhibition: neural mechanisms and treatment perspectives. *Semin. Arthritis Rheum.* 40, 250–266.
- Robert, H., Nouveau, S., Gageot, S., and Gagnière, B. (2009). A new knee arthrometer, the GNRB: experience in ACL complete and partial tears. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 95, 171–176.
- Roberts, D., Fridén, T., Stomberg, A., Lindstrand, A., and Moritz, U. (2000). Bilateral proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: A comparison between patients and healthy individuals. *J. Orthop. Res.* 18, 565–571.
- Robinson, R. O., Herzog, W., and Nigg, B. M. (1987). Use of force platform variables to quantify the effects of chiropractic manipulation on gait symmetry. *J. Manipulative Physiol. Ther.* 10, 172–176.
- Rodeo, S. A., Arnoczky, S. P., Torzilli, P. A., Hidaka, C., and Warren, R. F. (1993). Tendon-healing in a bone tunnel - a biomechanical and histological study. *J. Bone Jt. Surg.-Am. Vol.* 75A, 1795–1803.
- Rodríguez, S. M. (2018). Runmatic for running mechanics assessment (mobile app user guide). *Br J Sports Med* 52, 139–140.
- Roewer, B. D., Di Stasi, S. L., and Snyder-Mackler, L. (2011). Quadriceps strength and weight acceptance strategies continue to improve two years after anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Biomech.* 44, 1948–1953.
- Roldán, E., Reeves, N. D., Cooper, G., and Andrews, K. (2017). In vivo mechanical behaviour of the anterior cruciate ligament: A study of six daily and high impact activities. *Gait Posture* 58, 201–207.
- Rudolph, K. S., Axe, M. J., Buchanan, T. S., Scholz, J. P., and Snyder-Mackler, L. (2001). Dynamic stability in the anterior cruciate ligament deficient knee. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 9, 62–71.
- S**almon, L. J., Russell, V. J., Refshauge, K., Kader, D., Connolly, C., Linklater, J., et al. (2006). Long-term outcome of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft: Minimum 13-year review. *Am. J. Sports Med.* 34, 721–732.
- Sato, K., Tsuchiya, A., Hosokawa, T., and Komatsu, E. (2015). Incidence for graft rupture and contralateral injury after anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring autograft. *Physiother.* 101, eS1340–eS1341.
- Saxby, D. J., Bryant, A. L., Modenese, L., Gerus, P., Killen, B. A., Konrath, J., et al. (2016a). Tibiofemoral Contact Forces in the Anterior Cruciate Ligament-Reconstructed Knee. *Med. Sci. Sports Exerc.* 48, 2195–2206.
- Saxby, D. J., Modenese, L., Bryant, A. L., Gerus, P., Killen, B., Fortin, K., et al. (2016b). Tibiofemoral contact forces during walking, running and sidestepping. *Gait Posture* 49, 78–85.

- Scheffler, S., Unterhauser, F., and Weiler, A. (2008). Graft remodeling and ligamentization after cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 16, 834–842.
- Segond, P. (1879). *Recherches cliniques et expérimentales sur les épanchements sanguins du genou par entorse*. Aux bureaux du Progrès médical. Paris Available at: <https://archive.org/details/b22284321>.
- Seil, R., Mouton, C., Lion, A., Nührenbörger, C., Pape, D., and Theisen, D. (2016). La rupture du ligament croisé antérieur n'est pas univoque : définition de profils individuels. *Rev. Chir. Orthopédique Traumatol.* 102, 67–73.
- Shaw, T., Chipchase, L. S., and Williams, M. T. (2004). A users guide to outcome measurement following ACL reconstruction. *Phys. Ther. Sport* 5, 57–67.
- Shelbourne, K. D., and Klotz, C. (2006). What I have learned about the ACL: Utilizing a progressive rehabilitation scheme to achieve total knee symmetry after anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Orthop. Sci.* 11, 318–325.
- Shrier, I. (2015). Strategic Assessment of Risk and Risk Tolerance (StARRT) framework for return-to-play decision-making. *Br. J. Sports Med.* 49, 1311–1315.
- Sigward, S. M., Lin, P., and Pratt, K. (2016). Knee loading asymmetries during gait and running in early rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: A longitudinal study. *Clin. Biomech.* 32, 249–254.
- Sims, W. F., and Jacobson, K. E. (2004). The posteromedial corner of the knee: medial-sided injury patterns revisited. *Am. J. Sports Med.* 32, 337–345.
- Slauterbeck, J. R., Hickox, J. R., Beynon, B., and Hardy, D. M. (2006). Anterior cruciate ligament biology and its relationship to injury forces. *Orthop. Clin. North Am.* 37, 585–591.
- Slone, H. S., Romine, S. E., Premkumar, A., & Xerogeanes, J. W. (2015). Quadriceps tendon autograft for anterior cruciate ligament reconstruction: a comprehensive review of current literature and systematic review of clinical results. *Arthroscopy* 31, 541–554.
- Śmigielski, R., Zdanowicz, U., Drwięga, M., Ciszek, B., and Williams, A. (2016). The anatomy of the anterior cruciate ligament and its relevance to the technique of reconstruction. *Bone Jt. J.* 98-B, 1020–1026.
- Sole, G., Pataky, T., Tengman, E., and Häger, C. (2017). Analysis of three-dimensional knee kinematics during stair descent two decades post-ACL rupture - Data revisited using statistical parametric mapping. *J. Electromyogr. Kinesiol. Off. J. Int. Soc. Electrophysiol. Kinesiol.* 32, 44–50.
- Standring, S. (2016). *Gray's anatomy: the anatomical basis of clinical practice*. Forty-first edition. New York: Elsevier Limited.
- Steinkamp, L. A., Dillingham, M. F., Markel, M. D., Hill, J. A., and Kaufman, K. R. (1993). Biomechanical considerations in patellofemoral joint rehabilitation. *Am. J. Sports Med.* 21, 438–444.

Subburaj, K., Kumar, D., Souza, R. B., Alizai, H., Li, X., Link, T. M., et al. (2012). The acute effect of running on knee articular cartilage and meniscus magnetic resonance relaxation times in young healthy adults. *Am. J. Sports Med.* 40, 2134–2141.

Tashiro, Y., Sundaram, V., Thorhauer, E., Gale, T., Anderst, W., Irrgang, J. J., et al. (2017). In vivo analysis of dynamic graft bending angle in anterior cruciate ligament–reconstructed knees during downward running and level walking: comparison of flexible and rigid drills for transportal technique. *Arthrosc.* 33, 1393–1402.

Tashman, S., Kolowich, P., Collon, D., Anderson, K., and Anderst, W. (2007). Dynamic function of the ACL-reconstructed knee during running. *Clin. Orthop.* 454, 66–73.

Tegner, Y., and Lysholm, J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin. Orthop.*, 43–49.

Thoméé, R., Kaplan, Y., Kvist, J., Myklebust, G., Risberg, M. A., Theisen, D., et al. (2011). Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 19, 1798–1805.

Thoméé, R., and Werner, S. (2011). Return to sport. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 19, 1795–1797.

Thomson, A., Einarsson, E., Hansen, C., Bleakley, C., and Whiteley, R. (2018). Marked asymmetry in vertical force (but not contact times) during running in ACL reconstructed athletes <9 months post-surgery despite meeting functional criteria for return to sport. *J. Sci. Med. Sport.* 21, 890–893.

Van Eck, C. F., van den Bekerom, M. P., Fu, F. H., Poolman, R. W., and Kerkhoffs, G. M. (2013). Methods to diagnose acute anterior cruciate ligament rupture: a meta-analysis of physical examinations with and without anaesthesia. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 21, 1895–1903.

van Gent, R. N., Siem, D., van Middelkoop, M., van Os, A. G., Bierma-Zeinstra, S. M. A., and Koes, B. W. (2007). Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review. *Br. J. Sports Med.* 41, 469–480.

van Melick, N., van Cingel, R. E. H., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hullegie, W., et al. (2016a). Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br. J. Sports Med.* 50, 1506–1515.

Vauhnik, R., Morrissey, M. C., Perme, M. P., Sevsek, F., and Rugelj, D. (2014). Inter-rater reliability of the GNRB® knee arthrometer. *The Knee* 21, 541–543.

Waite, J. C., Beard, D. J., Dodd, C. A. F., Murray, D. W., and Gill, H. S. (2005). In vivo kinematics of the ACL-deficient limb during running and cutting. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 13, 377–384.

- Walden, M., Hagglund, M., Magnusson, H., and Ekstrand, J. (2016). ACL injuries in men's professional football: a 15-year prospective study on time trends and return-to-play rates reveals only 65% of players still play at the top level 3 years after ACL rupture. *Br. J. Sports Med.* 50, 744–750.
- Webster, K. E., Feller, J. A., Leigh, W. B., and Richmond, A. K. (2014a). Younger Patients Are at Increased Risk for Graft Rupture and Contralateral Injury After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am. J. Sports Med.* 42, 641–647.
- Webster, K., Feller, J., Anand, B., Whitehead, T., and Norsworthy, C. (2014b). Return to sport outcomes after revision anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Sci. Med. Sport* 18, e45.
- Wellsandt, E., Failla, M. J., and Snyder-Mackler, L. (2017). Limb Symmetry Indexes Can Overestimate Knee Function After Anterior Cruciate Ligament Injury. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 47, 334–338.
- Wilk, K. E., Arrigo, C., Andrews, J. R., and Clancy, W. G. (1999). Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in the female athlete. *J. Athl. Train.* 34, 177–193.
- Withrow, T. J., Huston, L. J., Wojtys, E. M., and Ashton-Miller, J. A. (2006). The Relationship between Quadriceps Muscle Force, Knee Flexion, and Anterior Cruciate Ligament Strain in an in Vitro Simulated Jump Landing. *Am. J. Sports Med.* 34, 269–274.
- Woby, S. R., Roach, N. K., Urmston, M., and Watson, P. J. (2005). Psychometric properties of the TSK-11: a shortened version of the Tampa Scale for Kinesiophobia. *Pain* 117, 137–144.
- Woo, S. L., Peterson, R. H., Ohland, K. J., Sites, T. J., and Danto, M. I. (1990). The effects of strain rate on the properties of the medial collateral ligament in skeletally immature and mature rabbits: a biomechanical and histological study. *J. Orthop. Res.* 8, 712–721.
- Wright, R. W., Dunn, W. R., Amendola, A., Andrich, J. T., Bergfeld, J., Kaeding, C. C., et al. (2007). Risk of tearing the intact anterior cruciate ligament in the contralateral knee and rupturing the anterior cruciate ligament graft during the first 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction a prospective MOON cohort study. *Am. J. Sports Med.* 35, 1131–1134.

Xergia, S. A., Pappas, E., and Georgoulis, A. D. (2015). Association of the single-limb hop test with isokinetic, kinematic, and kinetic asymmetries in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. *Sports Health* 7, 217–223.

Zavatsky, A. B., Beard, D. J., and O'Connor, J. J. (1994). Cruciate ligament loading during isometric muscle contractions. A theoretical basis for rehabilitation. *Am. J. Sports Med.* 22, 418–423.