



HAL
open science

Intérêt du Blood Flow Restriction sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA : revue de littérature et protocole

Florian Jaffredo

► To cite this version:

Florian Jaffredo. Intérêt du Blood Flow Restriction sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA : revue de littérature et protocole. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03014730

HAL Id: dumas-03014730

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03014730>

Submitted on 19 Nov 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



INSTITUT DE FORMATION EN MASSO-KINESITHERAPIE

22 Avenue Camille Desmoulins

29238 BREST CEDEX 3

Intérêt du *Blood Flow Restriction* sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA : revue de littérature et protocole

JAFFREDO Florian

En vue de l'obtention du Diplôme d'Etat de Masseur-Kinésithérapeute

Promotion 2016-2020

Juin 2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont permis à ce travail de fin d'étude de voir le jour :

Julien LOZACH, mon directeur de mémoire, pour l'intérêt et le temps qu'il a consacré à ce mémoire, son investissement, sa disponibilité et ses précieux conseils.

Christelle Hamon, ma formatrice référente, pour son suivi sur ces deux dernières années.

L'ensemble de l'équipe pédagogique de l'IFMK de BREST : Laurence ALEXANDRE, Marc LEROY, Ronan LESTIDEAU, Vincent CREACH et Thibault SIMONIN pour leur suivi et de leurs enseignements tout au long de ce cursus, ainsi que Dominique MADEC.

Alexandre LAVANANT, masseur-kinésithérapeute, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et sa disponibilité.

L'ensemble de mes relecteurs, et plus particulièrement à Nathanaël AUDREN pour son implication et le regard neuf qu'il a su porter sur ce travail.

Ma famille et mes amis, pour leur soutien tout au long de mes études.

Mes différents tuteurs de stages, pour leur contribution précieuse à ma formation.

Et enfin l'ensemble de cette promotion 2016-2020, et plus particulièrement les « Ravageurs », pour tous ces bons moments, malgré cette fin d'année si particulière.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Situation d’ancrage	1
1.2	Questionnement	2
2	Cadre conceptuel	3
2.1	Le ligament croisé antérieur	3
2.1.1	Généralités	3
2.1.2	Rééducation	7
2.2	Reprise de course à pied	13
2.2.1	Généralités	13
2.2.2	Intérêts de la reprise de course	14
2.2.3	Critères de reprise.....	15
2.3	Le <i>Blood Flow Restriction</i>	24
2.3.1	Généralités	24
2.3.2	Utilisation en rééducation.....	28
2.4	Problématique.....	32
3	Méthode.....	33
3.1	Revue de littérature	33
3.1.1	Méthodologie de la recherche.....	33
3.1.2	Résultats de la recherche	34
4	Résultats.....	37
4.1	Résultats des études	37
4.2	Protocole de recherche.....	38
4.2.1	Objectif et hypothèse.....	38
4.2.2	Population	38
4.2.3	Matériel et donnée	40
4.2.4	Protocole	40
4.2.1	Critère de jugement	46
4.2.2	Traitement des données	48
4.2.3	Analyse statistique	49
4.2.4	Faisabilité de l’étude	49
5	Discussion.....	52
5.1	Les données de la littérature	52
5.1.1	Hétérogénéité des protocoles	52

5.1.2	Impact du BFR sur la rééducation du LCA opéré.....	54
5.1.3	Limites de la revue	57
5.1.4	Effets supposés sur la reprise de course	57
5.2	BFR et reprise de course à pied.....	58
5.2.1	Justification des choix	58
5.2.2	Limites de l'étude	61
5.3	Retour sur les hypothèses.....	62
6	Conclusion.....	63
7	Références.....	64
8	Annexes.....	81

Liste des abréviations :

- SCO : Sporting Club de l'Ouest
- BFR : « *Blood Flow Restriction* » = restriction du flux sanguin
- ACSM : *American College of Sport Medicine*
- 1RM : Plus grande charge que l'on ne peut soulever qu'une seule fois
- LCA/LCP: Ligament Croisé Antérieur/ Ligament Croisé Postérieur
- RTP : « *Return To Practice* »
- HAS : Haute Autorité de la Santé
- ACLR : « *Anterior Cruciate Ligament Reconstruction* »
- PAPE : Point d'Angle Postéro-Externe
- KJ : Kenneth Jones : technique chirurgical par prélèvement du tendon rotulien
- DIDT : technique chirurgical par prélèvement du droit interne et du demi tendineux
- CCO/CCF : chaîne cinétique ouverte/fermée
- HL/LL: « *Heavy-Load* »/« *Low-Load* » = charge lourde/charge légère
- BFR+LL : renforcement sous occlusion vasculaire associé à des charges légères
- TVP : Thrombose Veineuse Profonde
- LOP/AOP : « *Limb Occlusion Pressure* » ou « *Arterial Occlusion Pressure* »
- LSI : « *Limb symmetry Index* »
- HHD : « *Hand-Held Dynamometer* » = Dynamomètre manuel

Table des illustrations :

Figure 1 : <i>Return to sport continuum</i> d'après Ardern et al. (2016).....	13
Figure 2 : Critères de reprise de course à pied et d'activité sportive modifiée après ACLR	16
Figure 3 : Présentation des <i>Hops tests</i> (Noyes et al, 1991)	17
Figure 4 : Reproductibilité des <i>Hops Tests</i> et du LSI (Reid et al, 2007).....	18
Figure 5 : Précision diagnostique du HHD / dynamomètre isocinétique (Almeida et al).....	20
Figure 6 : Version française du Lysholm score (Chaory et al, 2004)	23
Figure 7 : Score de Tegner (Chaory et al, 2004).....	23
Figure 8 : Résumé des recommandations d'utilisation du BFR (Scott et al, 2014).....	31
Figure 9 : <i>Flowchart</i> du processus de sélection des études (JAFFREDO Florian).....	35
Figure 10 : Arbre décisionnel autorisant le renforcement sur Leg Press	44
Figure 11 : Retour au sport en fonction du niveau (Gerometta et al, 2014).....	59

1 Introduction

1.1 Situation d'ancrage

Amateur de football, j'ai eu l'occasion pendant mon parcours de formation d'effectuer un stage au club de football professionnel du SCO d'Angers. Je me suis rendu compte pendant ce stage que la rupture des ligaments croisés était une blessure redoutée dans le sport, notamment dans le football. Ce type de lésion nécessite généralement une reconstruction chirurgicale et un arrêt de la pratique pour une durée de plusieurs mois (1). En intervenant également auprès des jeunes du centre de formation, j'ai pu constater que cette rééducation peut s'avérer complexe. En effet, la reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur entraîne une perte de force et une amyotrophie assez importante. L'objectif pour le joueur et pour les thérapeutes est de récupérer rapidement en force et en trophicité musculaire afin de pouvoir reprendre la course à pied et progressivement, l'activité sportive. Ce souci d'efficacité s'inscrit dans le concept d' « *Accelerated rehabilitation* », introduit au début des années 1990 par Shelbourne et Al (2).

Des recommandations existent pour répondre efficacement à ces objectifs de gain de force et de trophicité musculaire. L'ACSM (*American College of Sport Medicine*) recommande de travailler à 60-70% de la plus lourde charge que l'on ne peut soulever qu'une fois (1RM) pour gagner en force, et à 70-85% de la 1RM pour gagner en trophicité (3). Néanmoins, ces recommandations ne sont pas applicables à toutes les situations, notamment dans les premières semaines de rééducation post-opératoire du LCA opéré.

C'est en ce sens qu'une nouvelle technique de renforcement musculaire a suscité mon intérêt. Au cours de ce stage, j'ai eu l'occasion d'assister à la présentation d'un nouvel outil de renforcement musculaire basé sur l'occlusion vasculaire : le BFR (*Blood Flow Restriction*). Le principe est, comme son nom l'indique, de travailler avec une restriction du flux sanguin. Cette occlusion est réalisée par un brassard compressif placé autour du membre à travailler. Le prestataire parle « d'optimisation de la rééducation », dans le sens où cette technique permettrait, en étant associée à un renforcement à charge légère, d'avoir des effets similaires au renforcement à charge lourde.

Cette perspective d'obtenir des gains de force et de trophicité musculaire, sans devoir soulever de charges lourdes, m'a semblé présenter de réels intérêts pour la rééducation du LCA opéré. Dès lors, j'ai commencé à me renseigner sur le BFR en consultant la littérature scientifique. Face aux différentes opportunités que pouvait offrir un tel outil, je me suis alors décidé à choisir ce sujet pour ce mémoire de fin d'études.

1.2 Questionnement

Suite à une reconstruction du LCA, l'objectif des sportifs est généralement de reprendre le sport, ce qui apparaît comme un challenge tant pour le sportif blessé que pour le thérapeute (4). Cette reprise se fera de manière progressive en respectant certaines étapes, comme la reprise de la course à pied. Or, cette reprise nécessite de valider certains critères, notamment en terme de force musculaire. Les recommandations concernant le gain de force ne sont cependant pas applicables sur les premiers temps de rééducation post-opératoire. En effet, le travail à charge lourde (>60% de 1 RM) n'est pas autorisé, tant que le greffon n'est pas cicatrisé.

C'est là que l'utilisation du BFR apparaît intéressante. En effet, là où ces recommandations ne peuvent être appliquées, le BFR apparaît comme une belle alternative, en permettant d'obtenir des adaptations musculaires similaires à celles obtenues avec un travail à charge lourde (5). D'autant plus que les intérêts du BFR ne se limitent pas seulement aux adaptations musculaires.

Dans ce contexte pathologique de rupture du ligament croisé, où la rééducation est longue, le recours à l'occlusion vasculaire présenterait de réels intérêts, tant sur la qualité de la récupération que sur la durée. C'est sur ce dernier point que je souhaite insister, en cherchant à savoir si l'utilisation du BFR permettrait d'optimiser la rééducation post-opératoire ? D'en réduire le délai et/ou de permettre à des sportifs de reprendre la course à pied dans de meilleures conditions ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à ce questionnement, c'est tout d'abord une présentation du LCA opéré et sa rééducation, de la reprise de course à pied, et enfin du BFR qui sera réalisée dans notre cadre conceptuel. Dans un second temps, c'est une revue de la littérature puis un protocole visant à objectiver l'intérêt du BFR chez des sportifs opérés du LCA en vue de la reprise de course à pied qui seront présentés.

2 Cadre conceptuel

2.1 Le ligament croisé antérieur

2.1.1 Généralités

2.1.1.1 Epidémiologie

Les blessures du genou sont fréquentes. Selon l'HAS, c'est 36540 ligamentoplasties de genou qui ont été effectuées en France sur l'année 2008. Parmi l'ensemble de ces ligamentoplasties, 90% sont des reconstructions du ligament croisé antérieur (1). Ces déchirures du LCA représentent d'important coûts pour la société et apparaissent comme un véritable problème de santé publique (6).

La rupture du LCA est une atteinte fréquente dans la population sportive (7). Le sport apparaît comme un grand pourvoyeur d'atteintes du LCA, comme le met en avant l'HAS. Toujours dans ce sens, une étude menée par Miyasaka et al. montre qu'au moins 65% des ruptures du LCA sont directement imputables au sport (8).

Evidemment, tous les sportifs ne sont pas exposés de la même manière au risque de rupture du LCA. Outre les facteurs de risques inhérents à la personne, certains sports sont plus à risque que d'autres. Des études mettent en avant la prévalence de survenue d'une rupture dans différents sports, comme celle de Agel et al. Il en ressort que la prévalence était de 0,11 chez les footballeurs contre 0,08 chez les basketteurs (9). D'autres facteurs sont à considérer, comme par exemple le niveau de pratique. Concernant le football, ce sont les pratiquants à haut niveau qui apparaissent comme étant les plus à risque. En effet, Roos et al. mettent en avant une incidence de rupture 3,3 fois plus importante pour les professionnels que pour les amateurs (10).

2.1.1.2 Anatomie

Le genou est l'articulation intermédiaire du membre inférieur. Il met en relation trois os : le fémur, le tibia et la patella. C'est un système articulaire, composé de deux articulations: l'articulation fémoro-patellaire et l'articulation fémoro-tibial. Elles sont considérées comme « indissociables anatomiquement et fonctionnellement » selon Michel Dufour (11). Le genou est une articulation mobile, qui est cependant soumise à d'importantes contraintes mécaniques. Afin de supporter ces contraintes, le genou est pourvu d'éléments de stabilité passive et active. Le ligament croisé antérieur fait partie

de ces structures passives. Au même titre que le ligament croisé postérieur, le LCA fait partie du « pivot central » du genou. Ces ligaments sont intra-capsulaires et extra-synoviaux. Ils se croisent dans les plans frontal et sagittal et sont accolés l'un à l'autre. Le LCA passe en dehors du LCP.

Le ligament croisé antérieur prend son origine sur le tibia, sur la partie antérieure de l'aire inter-condyloire. Quasiment horizontal (contrairement au LCP qui lui est plutôt vertical), il se dirige obliquement en haut, en arrière et en dehors. Il vient se terminer sur le fémur, sur la partie postéro-supérieure de la face axiale de son condyle latéral. Ce ligament est long d'environ 4 centimètres. Il est moins bien vascularisé que le LCP, ce qui aura un impact sur sa cicatrisation. Au niveau de la constitution propre du LCA, les avis diffèrent. En effet, tous les auteurs ne s'accordent pas sur les différents faisceaux qui le composent. Odensten et al (12) le considèrent comme un seul ensemble fibreux, tandis que d'autres comme Friedrich et al en distinguent 2 (13), et d'autres 3 (14). Toujours est-il qu'il est globalement admis que le LCA se compose de deux faisceaux principaux : antéro-médial et postéro-latéral. A noter que ces faisceaux sont torsadés entre eux, ce qui confère plus de résistance au ligament.

D'autres structures jouent un rôle dans la stabilité du genou. La stabilité passive est aussi assurée par les 2 ligaments collatéraux (tibial et fibulaire), la capsule articulaire et les coques condyliennes. En ce qui concerne la stabilité active, elle est permise par de puissants groupes musculaires (quadriceps et ischio-jambiers), ainsi que par d'autres structures musculaires.

2.1.1.3 Biomécanique

Le LCA joue un rôle primordial dans la stabilité passive du genou (15). Il intervient dans les trois plans de l'espace : sagittal, frontal et transversal.

Dans le plan sagittal, le pivot central du genou (LCA et LCP) a un rôle de stabilisation. Le LCP assure son rôle de frein au tiroir postérieur du tibia par rapport au fémur, alors que le LCA empêche le mouvement de tiroir antérieur. Livesay et al. (16) montrent que la tension exercée sur le LCA sur un mouvement de flexion était largement majorée par la réalisation d'un tiroir antérieur. Une distinction entre les faisceaux antéro-médiale et postéro-latéral du LCA intervient au niveau de l'angulation du genou. Entre 0 et 45° de flexion, c'est le faisceau postéro-latéral qui est mis en

tension alors qu'entre 60 et 90° de flexion, c'est le faisceau antéro-médial (17). Le rôle des 2 faisceaux du LCA est complémentaire et synergique (15,17,18).

Dans le plan frontal, les ligaments croisés limitent les mouvements de varus et de valgus du genou : le LCA participe à la limitation du mouvement de valgus, tandis que le LCP participe lui à limiter le mouvement de varus du genou.

Dans le plan transversal, les ligaments croisés ont également une action. Le LCA et le LCP se croisent dans tous les plans anatomiques sauf dans le plan transversal. Ces derniers sont parallèles l'un à l'autre. C'est cette particularité qui leur permet à tous les deux d'avoir ce rôle de frein secondaire à la rotation médiale du genou (19). Lors de la réalisation d'une rotation médiale, les deux ligaments croisés vont venir s'enrouler l'un autour de l'autre, limitant ainsi le mouvement. Ils n'ont cependant aucune action sur la rotation latérale du genou. La rupture du LCA entraîne une laxité majorée en rotation médiale (20,21), et sa reconstruction permet de corriger cette laxité rotatoire (22).

Les tensions exercées sur le LCA ne sont pas les mêmes en fonction des chaînes cinétiques. En chaîne cinétique fermée (CCF), les contraintes sur le LCA sont moins importantes qu'en chaîne cinétique ouverte (CCO) (23–26). Il en est de même pour les contraintes exercées sur l'articulation fémoro-patellaire (27).

Les deux ligaments constituant le pivot central interviennent aussi dans la dynamique du mouvement. Ils assurent la continuité du mouvement de flexion/extension de l'articulation fémoro-tibiale. En effet, ces deux ligaments permettent de faire glisser les deux condyles fémoraux sur leur glène respective dans le sens inverse de leur roulement. Le LCA et LCP assurent ainsi la combinaison roulement/glissement.

Le ligament croisé antérieur joue un rôle essentiel dans la stabilité du genou, et la rupture de ce dernier a d'importantes conséquences biomécaniques.

2.1.1.4 Physiopathologie

Dans la majorité des cas, la rupture du LCA est directement liée à la pratique sportive (8). Elle est très présente dans les sports de pivot/contact (football, basketball, sport de combat)(28,29).

La lésion peut être causée par deux types de mécanismes (30). En effet, la rupture peut survenir suite à un mouvement non appuyé. C'est-à-dire que le mécanisme lésionnel est indirect. Par exemple, lors d'un mouvement d'hypertension du genou après une frappe dans le vide au football. La lésion du LCA peut aussi se faire de manière directe, à la suite d'un contact, ou bien de l'intervention d'un élément extérieur.

De même que nous retrouvons différents mécanismes, il existe différents niveaux d'atteintes, dont la rupture est le plus grave. Cette rupture peut être isolée, mais il est possible qu'elle soit associée à d'autres atteintes. Parmi ces atteintes groupées, nous retrouvons par exemple la triade antéro-médiale (lésion du LCA, du ligament collatéral tibial et du ménisque interne). La pentade (lésion de 5 structures) est l'atteinte groupée la plus grave, la plus fréquente étant la pentade postéro-externe (lésion du LCA, du LCP, ligament collatéral fibulaire, ménisque externe et PAPE). Ces lésions associées auront une influence sur la rééducation.

Néanmoins, c'est la rupture isolée du ligament croisé antérieur qui reste la plus fréquemment retrouvée.

2.1.1.5 Traitement

Il existe 2 types de prise en charge à la suite d'une rupture du LCA : le traitement chirurgical et le traitement orthopédique (ou conservateur). Le choix du traitement nécessite de considérer un ensemble de facteurs. Il découle d'une réflexion commune entre le patient et les professionnels de santé qui l'entourent. L'HAS propose en 2008 des critères d'orientation, afin de guider cette décision (1).

Historiquement, le traitement fonctionnel (ou conservateur) est le premier traitement qui a été mis en place pour la prise en charge du LCA (31). L'objectif est de retrouver une bonne mobilité et bonne stabilité du genou. Ce type de traitement présente de bons résultats fonctionnels sur le long terme (32). Fujimoto et al montrent d'ailleurs que, parmi les patients suivant ce traitement, 74% retrouvent un genou stable. Le traitement fonctionnel est envisagé pour un patient sans instabilité fonctionnelle, sans lésion méniscale associée et ne pratiquant pas de sport à pivot (1), ou encore jugé sédentaire et à faible demande sportive (33).

En ce qui concerne le traitement chirurgical, plusieurs études comme celle menée par Hurley et al (34) le considèrent comme le « *Gold standard* ». Il apparaît

comme la modalité de prise en charge la plus adaptée pour un patient souhaitant reprendre son activité sportive (35–37), et qui devra faire face à d'importantes contraintes mécaniques liées à sa pratique (38). On parlera de ligamentoplastie du ligament croisé antérieur. L'HAS définit la ligamentoplastie comme étant une « *intervention qui consiste en une reconstruction* » d'un ligament. L'objectif de la ligamentoplastie du LCA est de prévenir ou de supprimer l'instabilité fonctionnelle du genou et de limiter le risque de lésion méniscale secondaire. Historiquement, la première opération référencée d'un ligament croisé date de 1895 (39). Elle a subi de nombreuses évolutions jusqu'à aujourd'hui, et continue encore d'évoluer (34). Elle est aujourd'hui préférentiellement réalisée sous arthroscopie (40).

Il existe différents types de greffes pour remplacer le ligament rompu : l'autogreffe et l'allogreffe. Mais laquelle choisir ? Prentice et al. montrent que l'allogreffe est populaire aux Etats-Unis mais reste très peu utilisée en Europe (41). Une revue systématique conclut qu'il n'y a pas de différence significative entre l'allogreffe et l'autogreffe au niveau de la qualité de reconstruction du LCA. C'est l'argument économique qui est ici mis en avant. En effet, si l'autogreffe est disponible, il est plus rentable de l'utiliser plutôt que d'avoir recours à l'allogreffe (42). En France, c'est exclusivement la reconstruction par autogreffe qui est utilisée (1).

Cette autogreffe peut être réalisée par différentes techniques de prélèvement (1), dont les plus populaires sont le Kenneth Jones et le DIDT (43–45). Concernant le choix du transplant, bien que le Kenneth Jones ait pu être auparavant considéré comme le « *gold standard* » (46), c'est aujourd'hui le prélèvement d'ischios-jambiers qui est le plus fréquemment utilisé en Europe (34). Néanmoins, il n'y a pour l'heure pas de consensus concernant le choix de la technique (39). Chaque greffe a ses caractéristiques propres, dont certaines sont données en Annexe I, mais aucune ne présente un avantage significatif (47–50). Le choix du greffon doit se faire selon différents paramètres : préférence du chirurgien, activité du patient, lésions associées, morbidité du site donneur, âge, sexe, ... (1,34,39,47,51).

2.1.2 Rééducation

Pour l'individu opéré d'une rupture du LCA, l'objectif est généralement de reprendre son activité et de retrouver son niveau antérieur (36,37). Malheureusement, malgré toutes les évolutions concernant la chirurgie et la rééducation, le taux de récurrence

est important chez les individus qui s'orientent vers une reprise des sports pivots/contacts (52). Cette récurrence touche fréquemment le genou controlatéral (53).

La rééducation a pour vocation d'accompagner le patient vers sa reprise sportive tout en évitant cette récurrence et d'éventuelles séquelles au niveau du genou (54,55). Elle joue un rôle capital dans le devenir du genou, et du membre inférieur dans son ensemble. Elle se doit d'être adaptée, du moins au début, à la technique chirurgicale utilisée pour la reconstruction du ligament (47). En effet, les structures fragilisées ne seront pas les mêmes (quadriceps pour un KJ, les ischio-jambiers pour un DIDT). La prise en charge doit également tenir compte de la gravité de la lésion. En effet, contrairement à une lésion isolée du LCA, des lésions méniscales associées ne permettent pas de renforcer le quadriceps en CCF. L'existence de lésions méniscales contre-indique cette modalité de renforcement, bien que nécessaire dans les premières semaines de rééducation post-opératoire. De manière générale, cette rééducation post-opératoire évolue en fonction du processus de ligamentisation du greffon (1,55–57).

Différents paramètres sont à prendre en considération dans la rééducation post-opératoire du LCA, l'un des principaux étant le processus de ligamentisation.

2.1.2.1 Processus de ligamentisation

Le terme de ligamentisation est défini par Amiel en 1986 (58). Pendant ce processus de ligamentisation, le néo-ligament subit un ensemble de transformations dans l'objectif d'obtenir les caractéristiques le rendant quasiment identique au LCA. Le greffon obéit pendant cette période aux « lois générales de l'adaptation tissulaire », décrites par Roux en 1905. C'est-à-dire que le greffon adapte sa structure à sa nouvelle fonction, à travers un long processus continu. Ce processus peut néanmoins être divisé en différents stades, ce qui s'avère très utile pour guider la rééducation.

Il n'existe pour l'heure pas de consensus concernant la durée de ces différentes phases (57), mais il est important de retenir que dans les premiers jours suivant l'opération, la résistance mécanique du greffon est supérieure à celle du LCA. Le greffon est ensuite progressivement fragilisé jusqu'à atteindre son plus haut niveau de fragilité : c'est la nécrose avasculaire. De là, une revascularisation a lieu suivie d'une prolifération cellulaire. Enfin, il y aura une phase de remodelage du collagène. Ces modifications histologiques entraînent une diminution de la résistance du greffon. Les

contraintes que peut subir le transplant fragilisé peuvent conduire à une élongation voire une rupture (15). Néanmoins, ces contraintes s'avèrent bénéfiques et essentielles pour la suite du processus, afin de permettre une bonne organisation et maturation du collagène (59,60). Ces contraintes exercées sur le transplant sont essentielles à son développement, à condition d'être appliquées progressivement (61,62). Ce processus prend fin dès que plus aucun changement n'est observé sur le greffon. Là non plus, il n'y a pas de consensus concernant la durée totale de la ligamentisation. Les durées varient de 1 à 3 ans (57).

2.1.2.2 Critères de suivi post-opératoire

Historiquement, la rééducation suit les différentes étapes du processus de ligamentisation, en se basant sur des repères temporels (63). La rééducation du LCA a cependant évolué au fil des années. En effet, les recommandations actuelles remettent en cause l'utilisation des repères temporels, du moins leur utilisation exclusive (55,64,65). Néanmoins, ce critère temporel reste fortement ancré dans la littérature (56,66).

Il est aujourd'hui recommandé de s'appuyer sur des critères cliniques et fonctionnels pour guider la progression de la rééducation (55,67) et de les associer aux critères temporels (55,64,68–71). Une étude menée par Greenberg et al en 2018 (72) montre qu'aujourd'hui, la majorité des études (>80%) adopte une approche multidimensionnelle dans le suivi de la rééducation après l'ACLR, ce qui est conforme aux recommandations actuelles (55,73,74).

L'utilisation de critères objectifs semble judicieuse pour guider la rééducation, et permet de prendre en compte les variabilités individuelles des patients.

2.1.2.3 Phases de rééducation

Il existe un consensus général autour de l'intérêt d'une rééducation post-opératoire, même si ces composantes restent encore débattues (75). Elle se divise en 3 phases, avec pour chacune des objectifs spécifiques à atteindre (55). Ces différentes phases ont été établies à partir de *l'International Classification of Functioning, Disability and Health* mis en place par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2001 (76).

Afin de proposer une rééducation spécifique au patient, c'est la méthode du "traffic-light" de progression par phase qui est utilisée (55,77,78). Pour pouvoir passer à la phase suivante, il est nécessaire pour le patient d'atteindre tous les objectifs de la phase précédente (55). Le déroulement classique de la rééducation post-opératoire du LCA opéré est disponible en Annexe II, et ses différentes phases sont les suivantes :

Objectifs :

Phase 1	Récupérer une extension de genou de 0°, un genou sec, le contrôle volontaire du quadriceps et un schéma de marche dynamique actif.
Phase 2	Effectuer sans restriction des tâches spécifiques au sport et un travail physiquement exigeant (dont celui de la course à pied).
Phase 3	Retour au sport ou à un travail physiquement exigeant

2.1.2.4 Moyens de rééducation

Pour chacune des phases décrites précédemment, les modalités d'intervention sont nombreuses pour le masseur-kinésithérapeute, avec des niveaux de preuve différents. Ces niveaux de preuve, ainsi que les recommandations établies par van Melick et al sont disponibles en Annexe III (55).

La rééducation débute dès l'ACLR, pour une durée de 6 à 12 mois. Cependant, ce délai diffère d'une étude à l'autre, à l'image de celle menée par van Grinsven et al, qui se base sur une rééducation de 22 semaines (79). De récentes études montrent qu'une rééducation plus longue est nécessaire, puisqu'une grande majorité des patients n'atteint pas les objectifs de fin de rééducation au bout des 22 semaines. (80,81). Il n'existe à ce jour aucune preuve concernant le délai de rééducation ou un nombre de séances hebdomadaires idéal pour permettre le RTP dans les meilleures conditions (55).

La mise en charge immédiate du membre opéré est autorisée (82). Il est toutefois recommandé d'autoriser cette mise en charge totale si la démarche est jugée correcte (possiblement avec des béquilles), s'il n'y a pas de douleur, de gonflement ou d'augmentation de chaleur au niveau du genou.

La cryothérapie n'a pas d'effet sur le drainage, mais peut tout à fait être appliquée dès la première semaine post-opératoire afin de réduire d'éventuelles douleurs.

Le renforcement musculaire débute dès la première semaine après l'opération en mode isométrique. Les exercices isométriques sont jugés sans danger. A noter que pendant les premières semaines, l'électrostimulation peut être ajoutée à ce travail musculaire isométrique afin de favoriser la contraction volontaire du quadriceps. Une fois la sidération du quadriceps levée (généralement à partir de la deuxième semaine), le travail concentrique et excentrique peut débuter à condition que cela n'entraîne pas une augmentation de l'épanchement ou de la douleur du genou.

Les différentes chaînes musculaires sont à considérer. En effet, les modes concentrique/excentrique peuvent débuter en chaîne cinétique fermée dans un premier temps. Le passage en chaîne cinétique ouverte se fera à partir de la 4^{ème} semaine. Il est cependant nécessaire de considérer le type de greffe réalisé. Pour un prélèvement du tendon patellaire, le travail en CCO peut débuter à partir de 4 semaines avec une amplitude de 90 à 45° de flexion. L'ajout d'une résistance supplémentaire est possible. Pour un prélèvement sur les ischios-jambiers, le travail en CCO peut également débuter à 4 semaines dans une amplitude de 90 à 45°, mais l'ajout de charge supplémentaire ne peut être réalisé avant la 12^{ème} semaine. Pour chaque type de greffe, les amplitudes seront progressivement augmentées : 90-30° à la 5^{ème} semaine, puis 90-20° à la 6^{ème} semaine, 90-10° en 7^{ème} semaine pour ensuite autoriser l'amplitude totale.

L'altération des fonctions neuromusculaires et biomécaniques augmente le risque de rupture du LCA (83–85). Il est vivement recommandé d'intégrer un travail neuromusculaire au renforcement musculaire décrit précédemment afin d'optimiser les résultats de la rééducation. (86–92).

La reprise de l'activité est influencée par différents facteurs psychologiques. De ce fait, il est recommandé d'évaluer cette dimension psychologique de manière objective, en utilisant certaines échelles (93–97).

Dans la littérature, d'importantes variations sont observées concernant les protocoles utilisés dans les études (55,98). L'enquête menée par Greenberg et al met en avant une grande variabilité des lignes directrices, notamment pour les transitions vers la reprise d'une activité sportive (72). Des constatations qui viennent appuyer le fait qu'il est difficile d'observer un consensus concernant une prise en charge post-opératoire idéale (54,55,74,99–101). Ces dernières années, la rééducation du LCA opéré

est en constante évolution. Les recommandations internationales sont de bonne qualité, mais leur mise en application est encore trop peu retrouvée dans la littérature (102).

2.1.2.5 Le RTP

Le RTP peut être défini comme la reprise de la compétition (103). C'est l'objectif visé par la majorité des patients blessés au cours de leur activité sportive (36,37). L'inquiétude principale des patients tourne autour de la reprise du sport (103). Bien qu'il n'existe pas de preuve concernant une durée de reprise optimale, ce retour à la pratique n'est en général pas autorisé avant au minimum 6 mois (1,55,56).

D'après Ardern et al, 81% des patients réussissent à reprendre un sport après une ligamentoplastie du LCA, 65% retrouvent leur niveau d'avant et seulement 55% reprennent la compétition (65).

Bien qu'il soit retrouvé dans 85% des études, le critère temps ne doit pas se suffire à lui-même pour autoriser ou non le RTP (66). Dans une étude de Gokeler et al, une évaluation à 6 mois via une batterie de tests incluant saut et isocinétisme montre que la majorité des patients a besoin de poursuivre la rééducation (104). Les patients qui reprennent le sport après validation d'une batterie de tests de RTP ont un risque de rupture de greffe plus faible, et un risque plus faible d'autres lésions du genou (71,105).

Il est aujourd'hui recommandé de se baser sur une évaluation individuelle du patient, en utilisant un ensemble de critères cliniques et fonctionnels (55,67,73,74). En effet, de nombreuses caractéristiques inhérentes à chaque individu sont à considérer. C'est le cas par exemple du niveau d'activité physique, généralement évalué par le score de Tegner. La littérature montre que le niveau d'activité du patient avant l'opération est déterminant : les patients avec un niveau d'activité plus élevé reprennent plus facilement le sport que des individus ayant un faible niveau d'activité (106,107). Le risque de récurrence y est également moins important (108).

Quoiqu'il en soit, le retour au sport se fait progressivement en respectant différentes étapes. La reprise de la course à pied est l'une de ces étapes. C'est elle qui marque d'ailleurs le début du continuum vers le retour au sport (103).

2.2 Reprise de course à pied

2.2.1 Généralités

2.2.1.1 *Continuum vers le retour au sport*

Le délai de reprise sportive est souvent au centre des préoccupations du patient. Comme le montre Ardern et al, la question qui revient le plus souvent est « *Quand est-ce que je pourrai revenir sur les terrains de compétition ?* » (103). Il n'est pas aisé de répondre à cette question, au vu du nombre de paramètres à prendre en compte (type de blessure, type de sport, motivation, caractéristiques individuelles inhérentes à l'individu,...). D'autant plus qu'une grande variabilité existe dans la littérature, concernant les critères de reprise à considérer ou encore les différentes étapes pour y accéder. C'est en ce sens que pendant le 1^{er} congrès international de kinésithérapie du sport organisé par l'ISFPT (*l'International Federation of Sports Physical Therapy*), un groupe d'experts a établi un consensus à propos des différentes étapes conduisant au retour au sport (103). De-là est défini un continuum de retour au sport en 3 étapes, représenté sur la Figure 1 ci-dessous :



Figure 1 : *Return to sport continuum* d'après Ardern et al. (2016)

Dans ce continuum se distinguent 3 étapes : « *return to participation* », « *return to sport* » et « *return to performance* ». La course à pied s'inscrit dans le « *return to participation* » et marque le début de ce processus vers le retour au sport.

2.2.1.2 Définition

La course à pied peut être définie comme 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. Contrairement à la marche, il n'existe pas de phase durant laquelle les deux membres inférieurs sont simultanément en appuis* » (109). Elle apparaît comme une étape indispensable de la rééducation (68,110) et marque la transition entre la rééducation et le terrain (54).

2.2.2 Intérêts de la reprise de course

Suite à une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur, la reprise de la course à pied est une étape incontournable dans la rééducation post-opératoire en vue de la reprise d'une activité sportive (68,110–112). En plus des faibles tensions qu'elle exerce directement sur le LCA (113), la course à pied est un élément de base pour une majorité des activités sportives (54). Elle permet de développer les habiletés du patient, spécifiques aux besoins de son sport.

La reprise de la course permet de réduire le risque de se blesser à nouveau. En effet, il existe une association fonctionnelle entre le LCA et les structures musculaires à proximité de l'articulation du genou (114,115). La rupture du LCA a des répercussions sur ces structures musculaires. Une altération de l'activation musculaire sur le membre lésé est observée, entraînant une asymétrie (116). Cette asymétrie augmente le risque de blessure, en particulier en période de fatigue (117). La fatigue a notamment une influence significative sur le contrôle de l'alignement des membres pendant la réalisation de différentes tâches (118). L'entraînement aérobie via la course à pied permet de retarder l'apparition de cette fatigue, où le risque de blessure y est plus important.

En ce qui concerne la force, des études évaluant les effets de l'entraînement en course à pied ne constatent pas d'amélioration significative de la force musculaire avec seulement ce type d'entraînement aérobie (111,112). Il en est de même pour la récupération fonctionnelle du genou opéré. Il faut toutefois garder à l'esprit que l'entraînement en course à pied est très bien toléré, et reste indispensable (111,112). La course est un élément incontournable de la progression vers le RTP (54).

2.2.3 Critères de reprise

2.2.3.1 Un rapport bénéfice/risque à considérer

Autoriser la reprise de la course pied n'est pas quelque chose d'anodin. Cela nécessite de considérer un certain rapport bénéfice/risque (64). En effet, bien qu'elle n'exerce pas directement d'importantes tensions sur le ligament croisé antérieur, de l'ordre de 0,62N/BW (113), elle reste associée à un risque de blessure non négligeable (119). Après l'opération, la synovie reste inflammatoire (120), et ses cellules sont très réactives face aux stress articulaires, induits notamment par la course à pied. La course à pied exerce également d'importantes contraintes sur l'articulation fémoro-tibiale, pouvant conduire à un épanchement articulaire. (121,122). Ces contraintes peuvent s'avérer néfastes pour le greffon si la reprise est trop précoce (64). Le respect d'un délai post-opératoire est nécessaire pour une reprise de course en toute sécurité.

2.2.3.2 Le critère temporel

La reprise de la course à pied se fait généralement entre le 2ème et le 4ème mois post-chirurgie (1,54,68,112). La revue systématique menée par De Sa et al montre que certaines études autorisent la reprise de la course à partir du deuxième mois (39). Mais la plupart des études incluses dans cette revue l'autorise à 3 mois. Il n'existe cependant pas de délai post-opératoire standard et uniforme autorisant une reprise de la course à pied après une ACLR (54).

2.2.3.3 Les critères objectifs

L'utilisation exclusive d'un repère temporel semble désuète, voire inadaptée. Ce repère fixe peut être synonyme "d'échec" si le patient n'est pas en mesure de reprendre la course à une date donnée. Cet échec est valable pour le patient, mais aussi le kinésithérapeute, le chirurgien ou encore le médecin (57,60). Outre l'impact psychologique lié à l'échec, beaucoup de caractéristiques liées à l'individu entrent en jeu. L'unique considération du repère temporel ne permet pas de prendre en compte les variabilités interindividuelles concernant l'évolution de la rééducation (55,66,103). Il est recommandé de se détacher du critère temps, pour accorder plus de considérations à des critères plus objectifs (55,67,73,74,123,124).

Dans une enquête menée en 2017, Greenberg et al montrent que les critères les plus utilisés pour autoriser le reprise de la course à pied sont la force du genou, les tests fonctionnels et les tests d'équilibre, les amplitudes du genou ainsi que l'épanchement du genou (72). Ces critères sont représentés en bleu sur le diagramme ci-dessous :

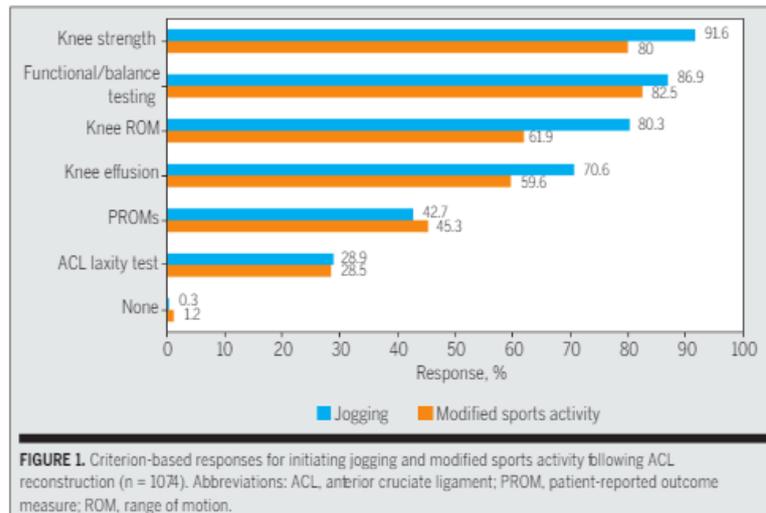


Figure 2 : Critères de reprise de course à pied et d'activité sportive modifiée après ACLR (Greenberg et al, 2017)

Les critères additionnels relevés par Rambaud et al sont similaires à ceux présentés ci-dessus par Greenberg et al, mais encore peu d'études les utilisent (125).

Bien qu'elle soit l'un des fondamentaux biomécaniques et techniques de beaucoup d'activités sportives (54), il reste difficile aujourd'hui d'établir un consensus autour de la reprise de la course à pied (55,126). Les recommandations actuelles sont en faveur de l'utilisation d'une combinaison de critères pour autoriser et permettre la reprise de la course à pied dans les meilleures conditions (54,55,67,73).

2.2.3.4 Une combinaison de critères

Comme pour l'ensemble de l'évolution de la rééducation suivant l'ACLR, il est important d'individualiser cette décision de reprise de course (55). Cette individualisation passe par la réalisation d'une batterie de tests. Cette combinaison comprend des tests fonctionnels, une évaluation de la force, des tests cliniques et une prise en compte du délai post-opératoire (54,55,64,71,104,127,128).

a) Tests fonctionnels : les *Hops Tests*

Les *Hops tests*, décrits par Noyes et al (129), sont les tests fonctionnels le plus fréquemment répertoriés dans la littérature (54,128). L'utilisation de ces *Hops tests* est recommandée pour guider les prises de décision de retour au sport et de reprise de course (69,123,130). Leur description est disponible en Annexe IV.

Ces tests reproduisent les mouvements proches de ceux réalisés lors des activités sportives (131). Ils permettent de réaliser une évaluation globale de la récupération des capacités fonctionnelles du genou, puisqu'ils renseignent sur la stabilité globale du membre inférieur (132,133), la force et la puissance musculaire (67,134,135) et la capacité du membre inférieur à encaisser des contraintes (136,137). Ces tests permettent également de renseigner sur la confiance du patient en son genou (129,138,139).

Les *Hops tests* sont au nombre de 4 :

- *Single hop test for distance* (SHT)
- *Triple hop test for distance* (THT)
- *Cross-over hop test for distance* (COHT)
- *6-m timed hope test* (6-m TH)

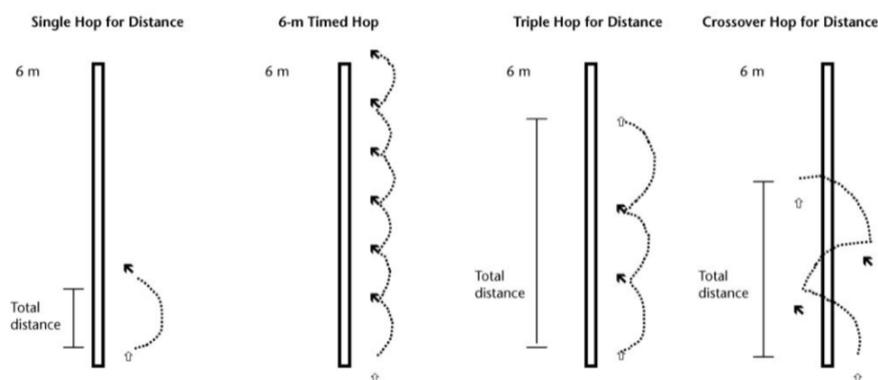


Figure 3 : Présentation des *Hops tests* (Noyes et al, 1991)

La distance réalisée sur chaque test est mesurée en cm, et est rapportée sur un ratio de symétrie du membre : le *Limb Symmetry Index* (LSI) (55,135). Ce rapport va comparer la performance du membre opéré par rapport au membre sain, et est calculé de la manière suivante :

$$LSI = \frac{\text{Distance du membre opéré}}{\text{Distance du membre non - opéré}} \times 100$$

Le résultat de ce rapport renseigne sur la symétrie fonctionnelle des membres inférieurs et s'exprime en pourcentage (135).

Ces 4 tests sont simples, rapides, nécessitent peu de moyens, et sont tout à fait réalisables en cabinet libéral (54,126). Ils ont aussi une bonne reproductibilité pour les patients opérés du LCA, comme nous le montrent Reid et al dans le tableau ci-dessous (137) :

Limb Symmetry Index	ICC (Lower 95% CI)	SEM (%) (Upper 95% CI)	Error in an Individual's Score (%)	Minimal Detectable Change (%)
Single hop test	.92 (0.87)	±3.49 (4.37)	±5.72	±8.09
6-m timed hop test	.82 (0.70)	±5.59 (7.01)	±9.17	±12.96
Triple hop test	.88 (0.80)	±4.32 (5.41)	±7.08	±10.02
Crossover hop test	.84 (0.74)	±5.28 (6.62)	±8.66	±12.25
Overall combination of hop tests	.93 (0.89)	±3.04 (3.81)	±4.99	±7.05

Figure 4 : Reproductibilité des Hops Tests et du LSI (Reid et al, 2007)

Néanmoins, ces tests ne sont pas tous adaptés à la reprise de course à pied. En effet, les Hops Tests sont également utilisés pour guider le RTP (55,129). Parmi ces tests, le COHT est le test le plus sensible (88%) pour identifier une fonction normale du genou (67). Cependant, ce test intègre des mouvements rotatoires provoquant d'importantes contraintes sur le greffon. Il n'apparaît pas adapté à ce moment de la rééducation (125). De plus, le 6-m TH est celui qui possède le plus petit ICC (0,82%) ainsi que la plus grande erreur standard de mesure (5,6%).

Au vu de la reprise de la course, l'utilisation du SHT et du THT est plus adaptée. Elle respecte l'intégrité de la greffe et assure une meilleure sensibilité d'évaluation (54,137,138,140). Les reproductibilités de mesure sont les suivantes : ICC = 0,92 pour le SHT, ICC = 0,88 pour le THT (137).

Pour ces 2 tests, le LSI est considéré comme normal dès lors que ce dernier est supérieur à 85% (138,141). Un LSI \geq 85% est recommandé pour autoriser la reprise la course à pied après l'ACLR (54,123,142). La reprise du sport de pivot/contact sera autorisée avec un LSI \geq 90% (67,69,130), bien qu'un LSI de 100% permettrait une reprise dans des conditions optimales (55).

b) Evaluation de la force musculaire

L'évaluation de la force musculaire est couramment utilisée pour autoriser la reprise de course à pied (72,125,144–146). Il est recommandé de l'utiliser conjointement à l'évaluation fonctionnelle décrite précédemment (55,56,144). La force du quadriceps et des ischios jambiers joue un rôle important dans la stabilisation active du genou (147) et dans son contrôle moteur (148). Néanmoins, des déficits peuvent s'installer. Ces déficits entraînent une asymétrie augmentant le risque de blessure (128). Cette asymétrie peut persister plusieurs années après l'opération (149,150). Il apparaît alors tout à fait justifié d'évaluer cette asymétrie en incluant une évaluation de la force musculaire dans les critères de reprise de course (54). Comme pour les tests fonctionnels, c'est le LSI qui est utilisé pour quantifier la symétrie de force des membres inférieurs après une ACLR (124,132,151,152).

L'isocinétisme est considéré comme le « *Gold standard* » de l'évaluation de la force musculaire des extenseurs et fléchisseurs du genou après une reconstruction du ligament croisé antérieur (153–158). C'est un outil fiable et reproductible pour l'évaluation de la force musculaire (155,156,159). Néanmoins, les protocoles utilisés dans la littérature sont très variables (154). Ces différences concernent les modes de contractions, les vitesses angulaires, l'amplitude ou encore le nombre de répétitions (154). Ces différences peuvent avoir une influence sur les résultats du test (67,160). Il n'y a aujourd'hui pas de consensus sur les modalités d'utilisation de l'isocinétisme dans la littérature (154). C'est en ce sens que la revue systématique menée par Undheim et al propose un protocole basé sur ceux utilisés dans la littérature actuelle. Les recommandations sont les suivantes :

- Nombre de répétitions : 5
- Groupes musculaires : Extenseurs et fléchisseurs
- Mode de contraction ; concentrique
- Vitesse angulaire : 60°/s
- Amplitude articulaire : 0-100°
- Utilisation de la correction de la gravité
- Paramètre analysé : pic de force (*Peak torque*)

Une fois le pic de force obtenu, le LSI est calculé comme suit :

$$LSI = \frac{\text{pic de force du membre impliqué}}{\text{pic de force du membre non – impliqué}} \times 100$$

Bien que considéré comme l’outil de prédilection de l’évaluation musculaire, l’isocinétisme n’est pas une modalité d’évaluation accessible par tous les praticiens. Ses coûts d’acquisition et d’entretien sont élevés, et elle requiert des compétences spécifiques ainsi qu’une certaine logistique (161–166).

Face aux inconvénients de l’isocinétisme, d’autres modalités d’évaluation de la force musculaire sont disponibles. Comparé à l’isocinétisme, le dynamomètre manuel (HHD) est une alternative plus accessible pour l’évaluation de la force (162,163,167–169). Pour la première fois décrite en 1916 par Lowett et Martin (170), cette modalité d’évaluation est de plus en plus utilisée en clinique et dans la recherche (162,166).

Outre sa facilité de mise en place et son faible coût, plusieurs études considèrent le dynamomètre manuel comme un outil d’évaluation valide pour des individus en bonne santé (171,172), des athlètes (166) ou encore pour les individus ayant des dysfonctions du membre inférieur (164,169). La revue systématique menée par Stark et al reconnaît que le HHD apparaît comme un instrument de mesure fiable pour l’évaluation de la force musculaire (164). Le dynamomètre portatif a une validité et une reproductibilité similaire à l’isocinétisme (162,164,173).

Le dynamomètre portable (HHD) est une alternative de mesure valide pour évaluer les asymétries de force du quadriceps après une reconstruction du LCA. Il a une forte valeur diagnostique et une excellente fiabilité test-retest (ICC= 0,98)(152,165).

	HHD
Sensitivity	63.4% (48.9–76.3%)
Specificity	100% (81.4–100%)
+LR	∞
– LR	0.3 (0.2–0.5)

LR likelihood ratio

Figure 5 : Précision diagnostique du HHD / dynamomètre isocinétique (Almeida et al)

D'autres études ont des résultats similaires à celle de Almeida et al, et constatent une validité modérée à forte et une reproductibilité bonne à excellente du dynamomètre portatif (HHD) comparé au dynamomètre isocinétique (166,171,172,174,175). Le HHD peut tout à fait être utilisé pour identifier les asymétries du quadriceps (165), étant donné qu'il permet lui aussi d'obtenir des mesures valides du pic de force (176).

Bien qu'une variabilité des protocoles soit retrouvée dans la littérature, l'évaluation de l'asymétrie du quadriceps par un dynamomètre portatif doit suivre une procédure précise et reproductible (165). Le protocole utilisé par Almeida et al se base sur ceux utilisés dans la littérature (171,175).

Après réalisation des mesures et obtention des meilleures valeurs de force d'extension du genou en Nm, ces mesures sont normalisées en Kg de la manière suivante :

$$\text{Force maximal (Kg)} = \frac{\text{Meilleure valeur (Nm)}}{\text{Poids (Kg)}} \times 100$$

Une fois la force maximale obtenue en Kg, il est possible de calculer le pic de force (*peak torque*) du quadriceps. Le pic de force est obtenu par multiplication de la force obtenue avec le dynamomètre (Kg), de l'accélération de la gravité (9,81) et de la longueur de bras de levier (m) :

$$\text{Force (Kg)} \times 9,81 \times \text{bras de levier (m)}$$

Une fois les valeurs de force maximale du membre opéré et du membre sain relevées, elles sont intégrées dans la formule suivante afin d'obtenir le LSI (58) :

$$LSI = \frac{\text{Pic de force du membre atteint}}{\text{Pic de force du membre non-atteint}} \times 100$$

Il est généralement admis qu'un LSI $\geq 90\%$ permet une reprise des sports à pivot/contact sans restriction (55). En ce qui concerne la reprise de la course à pied, les recommandations concernant les valeurs de LSI tiennent compte des modalités d'évaluation de la force musculaire (125). En effet, un LSI $>70\%$ obtenu après une évaluation isocinétique ; comprenant quadriceps et ischios jambiers ; autorise la reprise de la course à pied après une reconstruction chirurgicale du LCA (2,177–179). Pour ce qui est d'une évaluation isométrique de la force musculaire des membres inférieurs, un LSI $>70\%$ autorise une reprise de course (177,180–182). Pour une évaluation isométrique de la force du quadriceps, la reprise de course s'effectue si le LSI $>80\%$ (60,257–259).

c) Critères cliniques

L'autorisation de reprise doit aussi se faire à partir de critères cliniques (55,71,72,125). La douleur apparaît comme un critère important, puisqu'elle est utilisée comme critère de non inclusion à des programmes aérobie de course à pied (111). Dauty et al trouvent qu'il n'est d'ailleurs éthiquement pas concevable de faire reprendre la course à un patient encore douloureux (112). L'aspect du genou est aussi pris en compte : la reprise est autorisée pour un genou sec, non gonflé, et souple (112).

L'évaluation de l'aspect du genou peut se faire par le Lysholm score. Décrit pour la première fois en 1982 (186), le score de Lysholm permet initialement d'évaluer le genou après une ligamentoplastie. Son utilisation est désormais étendue à d'autres pathologies du genou (chondropathie, lésions méniscales). Cette échelle d'évaluation subjective comprend 8 items donnant un score sur 100 points : boiterie, aide à la marche, accroupissement, montée et descente d'escalier, épanchement, blocage/accrochage, stabilité, et douleur. Un score supérieur à 83 est considéré comme bon et très bon, entre 65 et 83 comme moyen et mauvais en dessous de 65.

Instabilité	Douleur		Blocage		Gonflement		
Jamais de dérobement	25	Jamais	25	Jamais	15	Jamais	10
En exercice, rarement	20	En exercice, modérée	20	Accrochage sans blocage	10	Lors d'exercices intenses	6
En exercice, fréquemment	15	En exercice, importante	15	Blocage occasionnel	6	Lors d'une activité courante	2
Occasionnel, vie courante	10	Marche > 2 km, importante	10	Blocage fréquent	2	Constant	0
Souvent, vie courante	5	Marche < 2 km, importante	5	Blocage aigu à l'examen	5		
À chaque pas	0	Constante	0				
Escaliers	Accroupissement		Boiterie		Canne		
Pas de gêne	10	Pas de gêne	5	Aucune	5	Jamais	5
Léger handicap	6	Léger handicap	4	Modérée ou occasionnelle	3	En permanence	2
Une marche à la fois	2	Pas plus de 90°	2	Sévère et constante	0	Station debout impossible	0
Impossible	0	Impossible	0				
Lysholm Total :	0 à 64 points Mauvais		65 à 83 points Moyen		84 à 100 points Bon / Excellent		

Figure 6 : Version française du Lysholm score (Chaory et al, 2004)

Des modifications ont été apportées au score de Lysholm par Tegner et al, afin que cette échelle puisse inclure le niveau d'activité du patient (187): c'est le score de Tegner :

Tegner :	Lysholm + Tegner :
Niveau d'activité cotation Lysholm – Tegner	
10 – Sport de compétition – niveau nation ou international : football	
9 – Sport de compétition – niveau inférieur : football, hockey sur glace, gymnastique	
8 – Sport de compétition : squash, badminton, athlétisme (saut), ski alpin	
7 – Sport de compétition : tennis, athlétisme (course à pied), moto-cross, speedway, hand-ball, basket-ball. Sport de loisir : football, hockey sur glace, squash, athlétisme (saut), cross-country.	
6 – Sport de loisir : tennis, badminton, hand-ball, basket-ball, ski alpin, jogging à raison de 5 entraînements par semaine	
5 – Sport de compétition : cyclisme. Sport de loisir : jogging à raison de deux entraînements par semaine sur sol irrégulier. Travail lourd : bâtiment...	
4 – Sport de loisir : cyclisme, jogging à raison de deux entraînements par semaine sur terrain plat. Travail d'activité moyenne : chauffeur routier, travail domestique éprouvant	
3 – Sport de compétition ou loisir : natation, travail léger, marche en forêt possible	
2 – Travail léger, marche en forêt impossible	
1 – Travail sédentaire, marche terrain plat possible	
0 – Handicap professionnel	

Figure 7 : Score de Tegner (Chaory et al, 2004)

Cette échelle est considérée comme valide et reproductible (ICC = 0,9), et a une bonne sensibilité au changement dans les 6 premiers mois suivant l'opération (188). L'échelle de Lysholm et Tegner est l'une des échelles les plus utilisées dans le suivi du genou après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur.

Le score de Lysholm est utilisé dès 3 mois dans la littérature (189) et est, par ailleurs, recommandé pour autoriser le « *return to function* » (190). Un score supérieur à 83 est considéré comme bon et indique que le genou est sec et indolore. Son état est alors jugé acceptable pour reprendre la course à pied. L'état du genou peut aussi être évalué par certains tests cliniques, comme le test de la Fluctuation. Ce test permet de vérifier l'épanchement du genou, et est sensible aux épanchements minimes (191).

2.3 Le *Blood Flow Restriction*

2.3.1 Généralités

2.3.1.1 Origine

Le BFR (= *Blood Flow Restriction*) est une technique de renforcement musculaire qui utilise la restriction du flux sanguin. Cette méthode est inventée au Japon dans les années soixante par le Dr. Yoshiaki Sato (192). Apparue dans un premier temps sous le nom de « *KAATSU training* », cette technique s'est aujourd'hui largement répandue dans le monde sous l'acronyme « BFR ».

2.3.1.2 Principe de fonctionnement

Le principe est simple. Par application d'une compression sur la partie proximale des membres, une occlusion sanguine sélective est réalisée (193,194), visant à limiter le retour veineux tout en permettant un apport artériel suffisant (195–197). Cette compression peut être réalisée de différentes manières : par des genouillères élastiques, des brassards élastiques ou encore des brassards en nylon. La compression entraîne un apport insuffisant en oxygène dans les tissus musculaires (198,199). Cette mise sous hypoxie entraîne un stress métabolique. De là, des influx nerveux sont envoyés au système nerveux central, l'informant ainsi d'un travail musculaire de haute intensité. L'utilisation du BFR consiste alors à simuler et recevoir les bénéfices de l'exercice à haute intensité tout en réalisant des exercices de plus faibles intensités (200). En d'autres termes, le BFR permet des améliorations de certains paramètres physiologiques, notamment au niveau de la masse musculaire, grâce à des charges légères, par accélération de la fatigue périphérique.

Le BFR permet de déclencher de nombreux mécanismes physiologiques complexes, aux avantages multiples. Nous avons par exemple :

- Une libération importante d'IL-6 (interleukine 6). Il s'agit d'une protéine (de type cytokine pro-inflammatoire) jouant un rôle dans divers processus physiologiques, comme l'hypertrophie (201).
- Une libération de cellules immunitaires jouant un rôle majeur dans la reconstruction des tissus musculaires après l'effort (201,202).
- Une augmentation du taux de lactate dans le sang ce qui favorise la libération d'hormones de croissance (203).

- Une diminution de l'expression de la Myostatin (MSTN), qui est un inhibiteur de la croissance musculaire (204).
- Une optimisation du recrutement des unités motrices (203).
- La prolifération des cellules satellites (205,206).
- L'augmentation de la production d'hormones de croissance (207).

Néanmoins, ces mécanismes restent encore trop peu investigués dans la littérature scientifique à ce jour (193,208,209).

2.3.1.3 Intérêts

Bien que les mécanismes qui en découlent ne soient pas suffisamment explorés, l'utilisation du BFR présente de multiples avantages.

a) Force musculaire et hypertrophie

A l'heure actuelle, la force musculaire et l'hypertrophie sont les paramètres les plus étudiés. Les études montrent que l'utilisation du BFR associée à un travail à charge légère (BFR+LL) augmente la force musculaire et l'hypertrophie. Ces modifications sont observées aussi bien chez des sujets sains (210,211), que chez des individus en rééducation (209). Ces adaptations musculaires sont considérées comme similaires à celles obtenues avec des résistances importantes (70% 1RM) (212–215).

Cependant, d'autres études montrent que ces adaptations restent inférieures à celles obtenues avec l'entraînement à charge lourde (209). Toutefois, ces adaptations sont supérieures au travail à charge légère uniquement (216,217).

Des gains d'endurance musculaire sont également renseignés dans la littérature (5,217–219). Cook et al observent par exemple une amélioration de l'endurance musculaire dès trente jours (220).

b) Prévention de l'atrophie

L'intérêt du BFR concernant la prévention de l'atrophie musculaire d'inutilisation est mis en avant (221,222). Comme le démontre l'étude de Kubota et al, l'utilisation du BFR sur la jambe immobilisée prévient la perte de trophicité musculaire.

c) Améliorations des capacités aérobies

Des améliorations de la capacité aérobie après utilisation du BFR sont relevées (223,224). Elles sont observées chez des jeunes (225,226), chez les personnes âgées (227), ainsi que chez des athlètes entraînés (223).

d) Améliorations cardio-vasculaires

Au niveau cardio-vasculaire, le BFR permet d'augmenter légèrement la rigidité artérielle. Des améliorations de filtration au niveau micro vasculaire sont mises en avant. Ces dernières seraient dues, grâce au BFR, à une augmentation de la capillarisation (228,229).

e) Amélioration fonctionnelle du genou

L'utilisation du BFR permet d'améliorer la fonction du genou. En effet, Mirando et al montrent dans leur revue systématique que le BFR a des effets bénéfiques sur les résultats des tests fonctionnels spécifiques aux atteintes du genou (230).

f) Diminution de la douleur

La douleur ressentie par le patient est un facteur influençant de manière négative la rééducation. Le BFR semble avoir un effet positif sur les douleurs antérieures de genou (231,232). Korakakis et al montrent une diminution significative des douleurs antérieures de genou après utilisation du BFR+LL. Cette étude insiste d'ailleurs sur l'intérêt de mettre place le BFR en amont de la rééducation, pour favoriser une mise en charge rapide des membres opérés. De plus, comparée à un entraînement à charge lourde, une diminution plus importante de la douleur est observée avec le BFR après une chirurgie de réparation ligamentaire (233).

g) Prévention des lésions musculaires

L'utilisation du BFR semble aussi avoir un rôle dans la prévention des lésions musculaires. En effet, Behringer et al montrent une diminution du taux de lésions musculaires chez des sprinters (234).

2.3.1.4 Risques

Des évènements indésirables liés à l'utilisation du BFR sont recensés dans la littérature. Ces évènements sont observés dans plusieurs domaines.

L'un des effets secondaires les plus fréquents est l'apparition d'ecchymoses (235). Un engourdissement transitoire lié à la compression des structures nerveuses ainsi que des vertiges sont également relevés (193). Il est recommandé d'informer les patients de ces possibles effets secondaires, tout en précisant qu'ils ne durent pas.

Une augmentation des douleurs musculaires les jours suivants la séance sont régulièrement observées, mais elles reviennent de leur propre chef à la normale (236–238). En ce qui concerne les atteintes structurelles pures, c'est-à-dire au niveau de la fibre musculaire, pas ou alors très peu de dommages mineurs sont observés (239). L'utilisation du BFR n'est pas responsable d'atteintes musculaires graves (5,240).

Des cas isolés de rhabdomyolyse sont recensés (241–243). Néanmoins, l'incidence de cette atteinte est relativement faible (235,239). Au final, le risque est possible, mais ne semble pas majoré par l'utilisation du BFR (198,235). Il n'est pas non plus jugé supérieur à celui lié au travail à charge lourde (244).

De plus, des cas isolés de thrombose veineuse profonde (TVP) sont retrouvés dans la littérature (245,246), mais l'incidence reste faible (235). Le risque de développer une TVP n'est pas supérieur à un travail à charge lourde (70% 1RM) (247).

Le BFR peut également apporter des modifications au niveau cardiovasculaire. Une augmentation de l'hypotension orthostatique est observée après une utilisation du BFR. Cette augmentation est jugée supérieure à celle observée après un travail à charge lourde (248). L'application d'une pression d'occlusion excessive peut aussi entraîner une augmentation de la pression artérielle (229). Le BFR doit être utilisé avec précaution chez des patients atteints de pathologies cardiaques.

La perception de l'effort et les douleurs musculaires augmentent avec le BFR (210). Cependant, ces réponses ne semblent pas être supérieures à celles d'un travail à charge lourde (233,249–251), et diminuent au fur et à mesure des séances (252). A noter que ce niveau de perception de l'effort et de la douleur entre un travail à lourde charge

et un travail sous occlusion avec des charges légères est similaire chez des patients opérés du ligament croisé antérieur (253).

Finalement, comme pour beaucoup de techniques utilisées en rééducation, le risque d'évènements indésirables est présent. L'apparition de complications liées à l'utilisation du BFR reste cependant relativement faible, mais il est important de bien informer les utilisateurs de ces risques (235). Le BFR apparaît comme une modalité de prise en charge sûre et prometteuse, notamment après une chirurgie du genou (253,254), à condition de bien respecter les recommandations d'utilisation (194,255).

2.3.2 Utilisation en rééducation

Bien que simple sur son principe, l'utilisation du BFR requiert une méthodologie rigoureuse, basée sur une évaluation individualisée (236,255).

2.3.2.1 Contre-indications et précautions d'usage

Les antécédents de TVP (thrombose veineuse profonde) sont considérés comme une contre-indication à l'utilisation du BFR (256,257). Il en est de même pour les individus présentant des risques élevés de développer une TVP. Ces risques comprennent les atteintes vasculaires, l'hypertension ou encore les opérations du membre inférieur dans les 6 derniers mois (214).

Afin d'éviter les complications et assurer la sécurité des utilisateurs, il est nécessaire de suivre les recommandations établies (194,198,255,258). Le résumé de ces recommandations est disponible en Figure 8.

Il y a dans un premier temps des précautions relatives au placement du brassard compressif. Comme évoqué précédemment, le brassard se place sur la partie proximale du membre (194,198,255,259).

Il est important de bien identifier les profils à risques (193,235,255,259). C'est en ce sens qu'une grille d'évaluation des profils à risques a été établie par Nakajima et al (258). Cette grille, traduite en français par l'organisme KINESPORT (cf Annexe V), permet d'identifier les individus à risques, et permet de guider la prise de décision du thérapeute. Un score supérieur ou égal à 4 proscrit l'utilisation du BFR.

Par une utilisation minutieuse respectant les mesures de sécurité, le BFR apparaît comme un outil très intéressant pour développer toutes les adaptations physiologiques décrites précédemment (255). Mais comme beaucoup d'outils et de techniques, le BFR ne peut pas être appliqué à tous les individus. Même s'ils sont faibles, les risques sont présents (235,255). C'est pour cela qu'il faut les éviter en identifiant les populations à risques de développer des complications.

2.3.2.2 Détermination de l'occlusion

L'utilisation du BFR nécessite de déterminer individuellement le niveau d'occlusion : on parle de LOP (*Limb Occlusion Pressure*) ou encore d'AOP (*Arterial Occlusion Pressure*)(194,198,255). Le LOP se définit comme la pression minimale requise pour stopper l'écoulement dans la partie distale par rapport à la compression (260), généralement réalisée par un brassard compressif (= *cuffs*) (194,209,255).

De nombreux paramètres sont à prendre en compte dans la détermination du LOP. En effet, le LOP dépend des caractéristiques de chaque utilisateur, mais également du matériel. Une pression d'occlusion déterminée n'aura pas le même effet sur l'occlusion d'un individu à un autre. C'est pour ces différentes raisons que le LOP doit être déterminé de manière individuelle (194,198,209,255).

La position du sujet influence aussi la détermination du LOP (261). En effet, il est montré que les valeurs du LOP sont plus élevées en position debout qu'en position assise (262). Bien que la position allongée soit fréquemment retrouvée dans la littérature, il est recommandé de déterminer le LOP dans la position d'utilisation du BFR (261,263).

Une méthode efficace est utilisée par Laurentino et al (204). A l'aide d'un échodoppler, ils déterminent le niveau de pression minimal nécessaire pour obtenir une occlusion. C'est la méthode de détermination du LOP la plus couramment utilisée (209,264). Des systèmes de Doppler automatisés ont fait leur apparition ces dernières années. Très populaire et considéré comme le « *gold standard* » pour la détermination du LOP, ce système automatisé est coûteux, et pas forcément abordable par tous les professionnels (194,265). Laurentino et al montrent néanmoins que l'utilisation d'un Doppler manuel est une bonne alternative (266). Ils montrent qu'il n'y a pas de

différences significatives entre le Doppler automatisé et le Doppler manuel pour déterminer le LOP.

2.3.2.3 Modalités d'exercices

Afin d'assurer un minimum d'efficacité, il est recommandé de travailler à au moins 50% du LOP (194). Il est également recommandé de ne pas dépasser les 80% du LOP afin d'assurer la sécurité des usagers.

Avant toute chose, le BFR doit être appliqué de manière progressive, afin de s'assurer qu'il soit bien toléré par le patient (194). En ce sens, Leonneke et al proposent un modèle d'utilisation progressif en 4 étapes (267) :

1. BFR seul pendant les périodes d'immobilisation
2. BFR pendant la marche
3. BFR avec de faibles charges
4. BFR avec de faibles charges combinées à un entraînement classique à charge lourde

Une fois les deux premières phases de progression réalisées, le BFR est associé à des charges légères. Il est recommandé que ces charges soient comprises entre 20 et 40% de la 1RM. Réaliser plusieurs séries de BFR à cette faible charge permet d'obtenir un stimulus métabolique similaire au travail à charge lourde. Le volume de travail conseillé est de 50 à 80 répétitions par exercice. C'est le schéma classique de 4 séries qui est utilisé : de 30, 15, 15, 15. Entre chaque série, un temps de repos de 30 à 45 secondes doit être accordé, et l'occlusion est maintenue pendant ces périodes de repos (194). Pour la population clinique, 2 à 3 sessions d'entraînement par semaine sont suffisantes. A noter qu'il est possible d'utiliser le BFR 2 fois par jour (194). Toutes ces recommandations sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	Recommendation	Factors to consider
Cuff application	Proximally around the limb to be trained	Trunk muscles can also benefit from BFR during multi-joint exercises
Cuff type	Wide cuffs (~6–13.5 cm) for the legs, and narrow cuffs (3–6 cm) for the arms	Inflatable cuffs and elastic knee wraps may be most practical
Occlusive pressure	Inflatable cuffs: 50–80 % of pressure to occlude arterial flow at rest Elastic wraps: should feel snug but not substantially restrict completion of desired repetition scheme	Limb circumference: Larger limbs require higher pressure Cuff width: Wider cuffs achieve occlusion at lower pressures
Exercise stimulus	BFR alone: Attenuated ↓ in muscle mass and strength BFR + walking/cycling: Moderate ↑ or maintenance of muscle mass and strength Low-load resistance exercise + BFR: substantial ↑ in muscle mass and strength	The type of exercise that can be tolerated should be considered before deciding on an appropriate BFR strategy (Fig. 1). The progressive model proposed by Loenneke et al. [67] should be followed for clinical populations
Type of exercise	Both single- and multi-joint exercises can provide benefit	Hypertrophy between limb and trunk muscles following multi-joint BFR training may be disproportionate
Exercise loads	Low-load exercise (~20–40 % 1RM or MVC)	Multiple sets of low-load BFR exercise provides similar metabolic stimulus to high-load training, but may not replicate neural demands
Training volume	50–80 repetitions per exercise (sets do not need to be performed to muscular failure)	Standard scheme of 30–15–15–15 repetitions equates to 75 total repetitions
Inter-set rest	30–45 s	To ensure sufficient venous pooling, occlusion should be maintained during inter-set rest periods
Training frequency	Clinical populations: 2–3 training sessions per week is sufficient Athletic populations: 2–4 sessions per week, in addition to normal high-load resistance training	May be possible to train twice per day with BFR

BFR blood flow restriction, *MVC* maximum voluntary contraction, *1RM* 1-repetition maximum, ↓ indicates decrease, ↑ indicates increase

Figure 8 : Résumé des recommandations d'utilisation du BFR (Scott et al, 2014)

Pour résumer, Le BFR est une méthode de renforcement sûre, à condition de suivre les recommandations d'utilisation. Il apparaît comme une bonne alternative au travail à charge lourde, lorsque que ce dernier n'est pas réalisable, notamment dans les premières semaines de rééducation suivant la reconstruction du LCA.

2.4 Problématique

Le retour à la pratique sportive est l'objectif visé par bon nombre de sportifs opérés du ligament croisé antérieur. Néanmoins, cette reprise doit se faire progressivement, en respectant certaines étapes. La reprise de la course à pied est l'une de ces étapes indispensables. Cette reprise est d'autant plus importante, puisqu'elle apparaît comme la première grande étape vers la reprise du sport. Mais cette reprise doit se faire selon des critères spécifiques.

Dans un contexte où la prise en charge du LCA opéré ne cesse d'évoluer, de nombreuses modalités d'intervention s'offrent aux masseurs-kinésithérapeutes. C'est le cas du BFR, qui connaît aujourd'hui un important succès. Bien qu'encore émergente, l'utilisation du BFR suscite beaucoup d'intérêt dans le domaine de la médecine et du sport. Le BFR nécessite une utilisation rigoureuse et apparaît comme une modalité d'intervention sûre. De nombreux avantages lui sont reconnus, notamment dans des contextes cliniques d'opération du genou. Il a une influence positive sur différents paramètres, comme la récupération de force musculaire et la récupération fonctionnelle du genou. C'est là qu'il semble tout à fait justifié de se demander si le BFR présente un réel intérêt dans la rééducation du LCA opéré, et s'il pourrait avoir une influence sur la reprise de course à pied.

De ce fait, l'objectif de ce mémoire est de répondre à la problématique suivante :
En quoi le BFR peut-il avoir un effet sur la reprise de la course à pied chez des sportifs opérés du ligament croisé antérieur ?

Au vu des informations mentionnées dans la partie précédente de ce mémoire, différentes hypothèses sont posées :

- Le BFR permet d'optimiser la rééducation post-opératoire du LCA
- Le BFR optimise la reprise de course à pied après une opération du LCA

3 Méthode

Afin de répondre à la problématique de ce mémoire, il s’agit dans un premier temps de faire l’état des lieux des connaissances en réalisant une revue non-systématique de la littérature concernant l’utilisation du BFR dans la prise en charge du LCA, et ses effets possibles sur la reprise de course à pied.

3.1 Revue de littérature

3.1.1 Méthodologie de la recherche

3.1.1.1 Caractéristiques des études

Pour cette revue non-systématique de la littérature, ce sont les études s’intéressant à la rééducation pré et post-opératoire de la reconstruction chirurgicale du LCA qui sont retenues. Ces études se doivent d’être comparatives. En effet, seules celles comparant une rééducation incluant le BFR à une rééducation standard sont incluses. Par soucis de compréhension, seules les études rédigées en anglais ou en français sont retenues.

3.1.1.2 Bases de donnée

Ce travail de recherche est réalisé à partir de bases de données PUBMED, PEDRO et COCHRANE. Il a débuté le 24 septembre 2019 et s’est terminé le 9 Janvier 2020. Pour le recueil et la gestion des données bibliographiques, c’est l’outil Zotero qui est utilisé

3.1.1.3 Equations de recherche

Les équations de recherche sont établies en fonction des spécificités de chaque base de données. Ces équations sont les suivantes :

PUBMED (((((((((anterior) OR cruciate) AND ligament)) AND (((injury) OR injuries) AND knee))) OR lower limb)) NOT animal)) AND (((((blood) AND flow)) AND ((restriction) OR restricted))) AND (((((training) OR therapy) OR exercise) OR rehabilitation) OR rehab) OR train))

PEDRO “blood flow” dans *Abstract and Title*, et “lower leg or knee” dans *Body Part*

COCHRANE “blood” AND “flow” AND “anterior” AND “cruciate” AND “ligament”

3.1.1.4 Stratégie de recherche

L'interrogation des bases de données permet d'identifier 285 articles. Suite à cela, une suppression des doublons et triplons est effectuée. Les études sont sélectionnées par une lecture de leur titre puis par la lecture des résumés (*abstract*) en se basant sur les critères PICO suivants :

- **P**opulation : reconstruction du ligament croisé antérieur
- **I**ntervention : utilisation du BFR
- **C**omparaison : rééducation classique
- **O**utcomes : critères de reprise de course à pied

Les articles dont les titres ne correspondent pas aux critères « P » et « I » des critères PICO susmentionnés ne sont pas retenus. En effet, Wang et al. montrent que peu importe le type de question de recherche, ce sont ces critères P et I qui sont les plus fréquemment utilisés. Les études dont les titres évoquent précisément des critères P et I différents des miens sont retirés. Ceux pour lesquels ces critères ne sont pas distinctement retrouvés sont conservés pour une analyse plus approfondie. La même démarche est ensuite effectuée pour la lecture des *abstracts*.

3.1.1.5 Qualité des articles

Afin de m'assurer de la qualité des articles recueillis et de la cohérence de leurs résultats, seuls les articles ayant un niveau de preuve compris entre 1 à 3 sont conservés (niveaux de preuve de *l'Oxford centre for evidence-based medicine*). La qualité méthodologique des études est aussi vérifiée pour l'échelle de cotation PEDro ([Annexe VI](#)).

3.1.2 Résultats de la recherche

Sur les 285 articles obtenus après interrogations des bases de données, seuls 7 articles sont conservés pour cette revue de littérature. L'ensemble du processus de sélection est représenté par le diagramme de flux suivant :

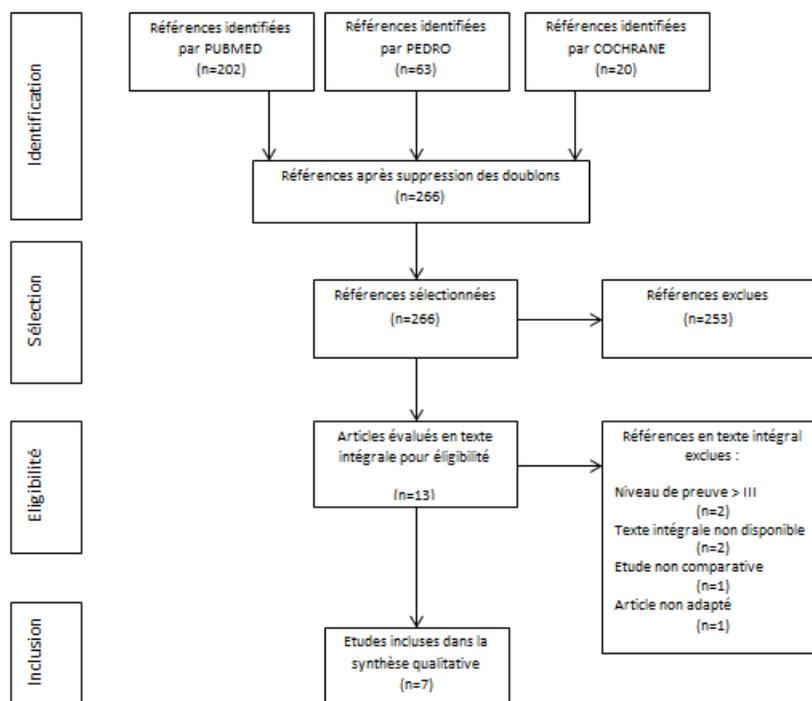


Figure 9 : Flowchart du processus de sélection des études (JAFREDO Florian)

3.1.2.1 Caractéristiques des études

Les études sélectionnées pour cette revue sont rédigées en anglais et ont été publiées entre 2003 et 2019. Parmi ces 7 études, il y a 4 essais contrôlés randomisés, 2 essais contrôlés à randomisation partielle et une étude de cohorte. L'overview des caractéristiques de ces études est disponible en [Annexe VII](#).

3.1.2.2 Qualité méthodologique

Pour rappel, la qualité méthodologique des études a été évaluée par l'échelle PEDro. Comme le montre le tableau disponible en [Annexe VIII](#), toutes les études ont obtenu un score supérieur à 5/10, puisque le premier item n'est pas comptabilisé dans la cotation finale.

3.1.2.3 Objectifs des études

Chacune des études sélectionnées dans cette revue poursuit un objectif commun : étudier l'efficacité du BFR chez des sujets opérés du LCA. Une étude reste cependant plus générale dans son analyse, puisqu'elle s'intéresse à l'efficacité du BFR chez des sujets souffrant de douleurs antérieures du genou de causes multiples, dont l'ACLR (231).

3.1.2.4 Paramètres évalués

En fonction de leurs objectifs, les études s'intéressent à mesurer différents paramètres (cf Annexe VII). Certaines d'entre elles s'intéressent aux réponses perceptuelles, en évaluant la perception à l'effort, les douleurs musculaires et les douleurs de genou (231,233,249).

D'autres études s'intéressent à la structure musculaire, en mesurant son épaisseur (254,268,269). L'une de ces études s'intéresse à ce paramètre architecturale en allant directement mesurer le diamètre des fibres musculaires (268).

Certains paramètres physiologiques sont aussi étudiés dans cette revue. L'étude de Zargi et al évalue l'activation du vaste médial et mesure également le flux sanguin (217).

Enfin, les effets du BFR sur la récupération de force musculaire sont également étudiés. L'évaluation de la force d'extension du genou est présente dans 3 études, dont celle de Ohta et al, qui s'intéresse aussi à la récupération de la force musculaire des fléchisseurs de genou en calculant le LSI (*Limb Symmetry Index*) (268).

Cependant, aucune étude ne s'intéresse spécifiquement aux effets du BFR sur la reprise de course à pied après une reconstruction chirurgicale du LCA.

4 Résultats

4.1 Résultats des études

Comme le montre la vue d'ensemble des protocoles mis en place par les études de cette revue (cf Erreur ! Source du renvoi introuvable.), les protocoles sont très variables.

L'ensemble des études de cette revue s'intéresse aux effets du BFR sur la rééducation post-opératoire. Mise à part celle de Kilgas et al qui se déroule à domicile, les études sont réalisées dans un environnement clinique contrôlé. La synthèse des résultats de cette revue de littérature, également disponible en Annexe XIV, est la suivante :

Plusieurs études mettent en avant une diminution des douleurs de genou après utilisation du BFR (231,233,249). Cette diminution des douleurs s'observe directement après l'exercice, mais également à distance. Hughes et al montrent d'ailleurs que ces résultats se pérennisent dans le temps (233). Toutefois, les douleurs musculaires s'avèrent plus importantes avec le BFR. Il en est de même pour la perception de l'effort.

Le BFR participe à la récupération de la trophicité musculaire. La récupération de la trophicité des extenseurs de genou après utilisation du BFR est d'ailleurs jugée significativement supérieure par Ohta et al (268), mais cette récupération n'est pas jugée significative dans toutes les études (269). A noter qu'une récupération de la trophicité est également observée plusieurs années après l'opération (254)

Enfin, ce sont les effets du BFR sur la force musculaire qui sont étudiés. Il en ressort que le BFR permet une récupération significativement supérieure de la force musculaire isométrique et isocinétique des extenseurs et fléchisseurs de genou, et participe à la récupération du LSI (268). Cette récupération de force musculaire est aussi observée à distance de l'opération par Kilgas et al (254).

Mais comme évoqué précédemment dans ce travail, aucune étude ne s'intéresse directement aux effets du BFR sur la reprise de course à pied. C'est pour cela qu'une étude ciblée sur les critères de reprise de course à pied est intéressante.

4.2 Protocole de recherche

Au vu des résultats obtenus par la précédente revue non-systématique de la littérature, il n'est pas possible de répondre à la problématique de ce travail. En effet, il n'y a, à ma connaissance, aucune étude qui s'intéresse aux effets du BFR sur la reprise de course à pied chez des sujets opérés du LCA. De ce fait, un protocole de recherche visant à apporter des éléments de réponse à cette problématique est ici proposé.

Cette étude interventionnelle comparative à risques et contraintes minimales est pensée afin d'explorer les effets du BFR sur les critères de reprise de course à pied chez des sportifs opérés du LCA.

4.2.1 Objectif et hypothèse

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les effets de l'utilisation du BFR, comparé aux modalités de renforcement musculaire standard, sur les critères de reprise de course à pied, chez des sportifs opérés d'une rupture isolée du ligament croisé antérieur au cours d'un programme de rééducation post-opératoire.

L'hypothèse principale est que le BFR serait plus efficace que le renforcement musculaire standard pour valider les critères de reprise de course à pied.

4.2.2 Population

Le recrutement des sujets se fera par la réalisation d'une enquête téléphonique auprès des masseurs kinésithérapeutes libéraux assurant la prise en charge pré-opératoire de sportifs avec une lésion du ligament croisé antérieur, ainsi que leur prise en charge post-opératoire. Une rencontre aura lieu en amont avec les masseurs-kinésithérapeutes souhaitant intégrer ce projet d'étude afin de leur présenter en détail le déroulement du protocole.

Les patients éligibles recevront une information claire et loyale à l'oral et à l'écrit, et donneront ou non leur consentement écrit en remplissant le formulaire d'information et de consentement (Annexe IX), conformément à la déclaration d'Helsinki. Ils seront ensuite inclus ou non à l'étude après vérification des critères d'inclusion et de non-inclusion.

4.2.2.1 Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion correspondent aux critères permettant d'inclure les sujets à l'étude. Afin de pouvoir être inclus dans cette étude, les sujets doivent :

- Donner leur consentement à l'écrit, après avoir reçu une information claire et loyale
- Etre âgés de 18 à 30 ans
- Avoir une reconstruction chirurgicale du LCA, suite à une lésion isolée du ligament croisé antérieur
- Etre considérés comme sportifs avant l'opération (Score de Tegner ≥ 7)

4.2.2.2 Critères de non-inclusion

Les critères de non-inclusion correspondent aux critères n'autorisant pas l'inclusion des sujets à l'étude. Ces critères de non-inclusion à l'étude sont :

- Avoir des lésions méniscales
- Avoir des antécédents de troubles neurologiques, cardio-vasculaires, métaboliques
- Obtenir un score >4 à la grille d'évaluation des profils à risques de développer des complications liées au BFR (Annexe V)
- Absence de consentement

4.2.2.3 Critères d'exclusion

Les critères d'exclusions correspondent aux critères faisant sortir les sujets de l'étude après leur inclusion. Les motifs d'exclusion seront à chaque fois précisés. Ces critères d'exclusion de l'étude sont :

- Ne pas terminer l'étude
- Développer des complications liées à la chirurgie
- Obtenir un score de Lysholm inférieur à 83 au moment de l'évaluation

4.2.3 Matériel et donnée

Le BFR sera appliqué en utilisant un système de tourniquet personnalisé (PT) et automatisé. Ce système automatisé calculera la pression minimum requise permettant d'obtenir l'occlusion artérielle totale. Ce système comprend un brassard, relié par un tuyau étanche au système, permettant de réguler automatiquement les niveaux de pressions. Le brassard sera placé sur la partie la plus proximale du membre à travailler. La pression d'occlusion sera déterminée individuellement pour chacun des patients du groupe test, avant chaque session d'entraînement. Le LOP (*Limb Occlusion Pressure*) sera déterminé dans le même positionnement du corps que le sujet aura pour utiliser le BFR. L'occlusion sera de 50% pour la première session, puis sera augmentée de 10% à chaque séance jusqu'à atteindre 80%. La pression d'occlusion sera ensuite fixée à 80% du LOP pour toute la durée du protocole. Le LOP sera déterminé avant chacune des sessions.

4.2.4 Protocole

4.2.4.1 Inclusion et échantillonnage

La demande de consentement et la vérification des critères d'inclusion et de non inclusion à l'étude seront réalisées par les masseurs-kinésithérapeutes participants, au cours de la dernière séance de rééducation pré-opératoire. Après obtention du consentement et vérification des critères d'inclusion et de non inclusion, les patients rempliront une fiche de renseignement général (âge, taille, poids, IMC, type de greffe) afin d'établir les caractéristiques de l'échantillon.

Une estimation de la 1RM sera également réalisée pendant la dernière séance de prise en charge pré-opératoire. La 1RM correspond à la charge maximale que l'on ne peut soulever qu'une seule fois. Elle sera utilisée comme repère afin de déterminer les charges d'exercices utilisées pour les sessions de renforcement musculaire. Pour chaque patient inclus à l'étude, l'estimation de la 1RM sera réalisée sur les machines de *Leg Press* et de *Leg Extension*. Afin de déterminer cette valeur prédictive de 1RM, les thérapeutes suivront le protocole décrit en Annexe X.

Les sujets seront ensuite répartis de manière aléatoire en 2 groupes. Afin de garantir une assignation secrète, la randomisation se fera par une personne tierce à l'étude, à l'aide d'enveloppes opaques, scellées et numérotées. Ces enveloppes

contiendront 4 papiers repliés en 4 contenant 2 papiers codés « groupe C » (groupe contrôle) et 2 autres codés « groupe T » (groupe test). Il sera alors demandé aux sujets de piocher sans regarder. Cette procédure de randomisation se fera de manière séquentielle, puisque les 4 premiers sujets piocheront dans l’enveloppe 1, les 4 suivants dans l’enveloppe 2 et ainsi de suite. La personne en charge de la randomisation renseignera le bras alloué sur la fiche de renseignement général du patient, qui sera transmise à l’investigateur de l’étude qui rentrera ces données dans un tableur. L’assignation sera donc secrète, et elle se fera en groupes parallèles à deux bras :

- Groupe contrôle : groupe suivant un protocole de rééducation standard
- Groupe test : groupe qui suivra le même protocole que le groupe contrôle sauf qu’il utilisera en plus le BFR

4.2.4.2 Déroulement global de l’étude

L’étude débutera après l’opération, et se déroulera sur une période de 12 semaines :

Pré-op		OP	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Inclusion + 1RM	Randomisation		Rééducation											Evaluation
			Rééducation + BFR											Evaluation

Après inclusion et randomisation, le programme de rééducation débutera dès la première semaine post-opératoire. Les deux groupes suivront un même programme de rééducation post-opératoire standardisé, à raison de 3 séances la première semaine puis de 2 séances par semaine. L’étude comprendra un total de 25 séances. Chaque séance sera espacée d’au moins 48h. A chaque séance les participants suivront une prise en charge post-opératoire complète. Seule la partie renforcement musculaire sera différente entre les 2 groupes.

Les participants seront évalués au cours de la 12^{ème} semaine de l’étude, pendant la 25^{ème} séance. Cette évaluation à la 12^{ème} semaine post-opératoire est conforme aux délais usuels de reprise de course retrouvés dans la littérature.

4.2.4.3 Protocole de rééducation standard du LCA

Les 2 groupes suivront une rééducation post-opératoire standard pendant toute la durée de l'étude. Les thérapeutes suivront les recommandations standards de prise en charge du LCA opéré concernant la mobilisation, le massage, la prise en charge antalgique, la marche, la proprioception, le renforcement musculaire global... Pour cela, ils suivront la fiche de synthèse rééducative disponible en Annexe II.

4.2.4.4 Sessions de renforcement musculaire du quadriceps

Chacune des séances de rééducation comprendra une session de renforcement musculaire. Cette session sera supervisée par l'un des thérapeutes participant à ce travail de recherche. Les protocoles d'exercices qui seront mis en place sont conçus conformément aux recommandations concernant la rééducation du LCA opéré et l'utilisation du BFR.

a) Semaine 1 de rééducation post-opératoire

L'objectif de cette première semaine de rééducation post-opératoire est de retrouver un contrôle volontaire du quadriceps, en levant sa sidération. Les patients suivront 3 séances au cours de cette première semaine.

Pour lever la sidération du quadriceps et obtenir un contrôle volontaire du quadriceps, les sujets du groupe contrôle réaliseront l'exercice de « l'écrase coussin ». Ils seront installés sur une table d'examen, en position assise. Un coussin de positionnement standard (demi-lune) sera placé sous le genou opéré. Les thérapeutes donneront comme consigne aux sujets de venir écraser le coussin pendant 2-3 secondes, en contractant la cuisse et en relevant bien les orteils. Les sujets du groupe test réaliseront le même exercice selon les mêmes modalités, mais en utilisant en plus le BFR. En fonction du groupe d'allocation, les exercices seront réalisés selon les modalités suivantes :

Groupe contrôle	Groupe TEST
30, 15, 15, 15 mouvements 30 secondes de repos	30, 15, 15, 15 mouvements 30 secondes de repos
X2 (1min de repos)	X2 (1min de repos)
	50 à 70% LOP

Les thérapeutes veilleront à la bonne réalisation de cet exercice, en veillant à ce que la patella s'ascensionne bien à la contraction. Cet exercice doit rester indolore. Des précautions relatives au site de prélèvement seront prises pour la réalisation de cet exercice. Pour une greffe de type KJ, cet exercice sera réalisé en co-contraction avec les ischios jambiers en demandant au sujet d'enfoncer le talon dans la table. Pour une greffe de type DIDT, l'exercice ne sera pas réalisé en co-contraction. Il sera demandé au sujet de ne pas chercher à enfoncer le talon dans la table.

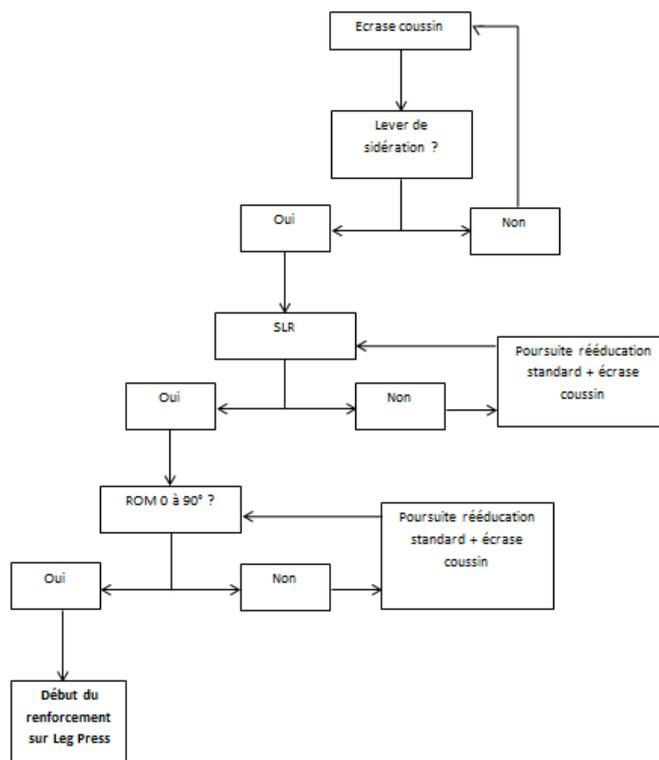
L'activation du quadriceps sera vérifiée par le thérapeute qui demandera au patient de réaliser une série de 10 répétitions d'élévation de jambe tendue. Aucun délai d'activation ne devra être observé sur les 10 répétitions pour que l'activation du quadriceps soit reconnue.

b) Semaine 2 et 3 de rééducation post-opératoire

A partir de la deuxième semaine, les participants seront vus 2 fois par semaine. Dès lors que l'activation du quadriceps sera effective, le renforcement musculaire se fera en mode concentrique/excentrique en CCF sur une machine de presse à jambe non inclinée (*Leg Press*). Avant de pouvoir travailler sur la machine, les patients devront néanmoins remplir les critères suivants :

- Soulever la jambe sans douleur et sans soutien (SLR), pendant plus de 5 secondes
- Avoir une amplitude de mouvement de genou de 0 à 90°
- Activation du quadriceps

S'ils ne sont pas validés, le travail musculaire se poursuivra en isométrique sur la table d'examen. Les critères seront vérifiés à chaque séance. Dès que ces critères seront validés, les participants réaliseront le protocole qui leur est attribué. L'autorisation du travail sur *Leg Press* se fera à partir de l'arbre décisionnel suivant :



SLR = *single leg raise* ; ROM = *range of motion* (amplitude de mouvement)

Figure 10 : Arbre décisionnel autorisant le renforcement sur Leg Press

Les deux groupes réaliseront le même échauffement standardisé. Ce protocole d'échauffement est le suivant : Chaque sujet devra réaliser 5 minutes sur tapis de marche à vitesse libre et à inclinaison nulle, puis 10 répétitions de Leg press sur la jambe opérée à un poids choisi par le participant. Une période de repos de 5 minutes sera ensuite respectée avant de réaliser les exercices. Les protocoles réalisés sur la Leg Press en fonction des groupes sont les suivants :

Groupe contrôle	Groupe test
3x10 répétitions 30 secondes de repos 60% 1RM	4x (30, 15, 15, 15) 30 secondes de repos 1 min de repos entre les sets 30% de la 1RM
	80% LOP

Ces exercices sur *Leg press* seront réalisés 2 fois par semaine à partir de la deuxième semaine, en unipodale sur le membre opéré. Le renforcement musculaire se fera également sur le membre controlatéral, selon les modalités standards.

c) A partir de la 4^{ème} semaine de rééducation post-opératoire

Conformément aux recommandations sur la rééducation du LCA opéré, la mise en tension progressive du transplant est nécessaire à son développement. C'est pour cela qu'à partir de la 4^{ème} semaine de rééducation post-opératoire, les sessions de renforcement musculaire seront réalisées en CCO sur une machine de *Leg extension*. Ces exercices seront réalisés de la manière suivante :

Groupe contrôle	Groupe test
3x10 répétitions 30 secondes de repos 30% 1RM	4x (30, 15, 15, 15) 30 secondes de repos 1 min de repos entre les sets 30% de la 1RM
	80% LOP

Les thérapeutes veilleront à ce que les exercices soient réalisés de manière correcte. Il sera également donné comme consigne aux sujets de réaliser cet exercice en co-contraction avec les ischios-jambiers.

Les exercices en CCO sur *Leg extension* seront réalisés dans une amplitude 90 à 45°. L'amplitude de travail sera progressivement augmentée, uniquement si les participants ne ressentent pas de douleurs de genou, et qu'il n'y ait pas d'épanchement. En cas de doute de la part du sujet et/ou du thérapeute, l'épanchement sera vérifié en réalisant le test de la fluctuation décrit en Annexe XI. L'augmentation des amplitudes en CCO se fera de la manière suivante :

- Semaine 4 : 90 à 45°
- Semaine 5 : 90 à 30°
- Semaine 6 : 90 à 20°
- Semaine 7 : 90 à 10°
- Semaine 8 : amplitude totale

L'augmentation de la charge (% de la 1RM) se fera progressivement pour les 2 groupes. Dans un premier temps, les patients travailleront avec des charges équivalentes à 30% de leur 1RM. Ces charges seront augmentées de 10% de la 1RM lorsque le patient arrivera à réaliser 2 répétitions supplémentaires au nombre de répétitions indiquées sur 2 sessions d'entraînements consécutives.

A partir de la semaine 8, les sessions de renforcement musculaire se poursuivront selon les mêmes modalités, et se feront dans la totalité des amplitudes de flexion/extension du genou. L'augmentation progressive des charges de travail se poursuivra en suivant les mêmes modalités que décrites précédemment.

d) Semaine 12

Au cours de la douzième semaine de rééducation post-opératoire, plus précisément sur la dernière séance, les patients seront évalués afin de vérifier s'ils sont en mesure de reprendre la course à pied. Cette évaluation sera réalisée dans un premier temps par le score de Lysholm, qui permettra d'identifier les sujets qui ne seront pas éligibles à la réalisation des tests.

4.2.1 Critère de jugement

Le critère de jugement principal de cette étude est le *Limb Symetry Index* (LSI), en tant qu'indicateur de la symétrie fonctionnelle des membres inférieurs, mais également de la symétrie de force entre les 2 quadriceps. Cet index de symétrie sera exprimé sous la forme d'un rapport.

4.2.1.1 Prérequis à l'évaluation

Le calcul des LSI se fera via les modalités d'évaluation suivantes :

- Réalisation des Hops Test
- Evaluation de la force maximale isométrique des Quadriceps

Au préalable, l'aspect clinique du genou sera évalué de manière subjective par le score de Lysholm. Si ce score est supérieur à 83, les sujets seront autorisés à poursuivre l'étude en réalisant les tests de reprise de course à pied. A l'inverse, si ce score est inférieur à 83, les patients seront exclus de l'étude. Cette évaluation sera réalisée par des

investigateurs différents des thérapeutes ayant supervisé les exercices. Les évaluateurs n'auront pas connaissances de l'allocation des groupes.

4.2.1.2 LSI fonctionnel

L'évaluation de la symétrie fonctionnelle des membres inférieurs se fera par la réalisation des Hops Test décrits par Noyes et al. Parmi ces tests, seuls le *Single hop test for distance* (SHT) et le *Triple hop test for distance* (THT) seront réalisés en suivant le protocole décrit en Annexe IV.

Les meilleures performances réalisées (en cm) sur ces deux tests par le patient avec son membre inférieur non-opéré et son membre inférieur opéré seront retenues. Dès que ces valeurs seront obtenues, l'index de symétrie du membre (LSI) de chaque test sera calculé de la manière suivante :

$$LSI_{SHT} = \frac{\text{Distance du membre opéré}}{\text{Distance du membre non - opéré}} \times 100$$

$$LSI_{THT} = \frac{\text{Distance du membre opéré}}{\text{Distance du membre non - opéré}} \times 100$$

Afin d'obtenir le LSI fonctionnel des membres inférieurs, une moyenne entre les LSI du SHT et du THT sera calculée :

$$LSI_{fonctionnel} = \frac{LSI_{SHT} + LSI_{THT}}{2}$$

4.2.1.3 LSI Force

L'évaluation de la symétrie de la force d'extension de genou entre les 2 membres inférieurs sera réalisée par une mesure de la force maximale isométrique des quadriceps. Ces mesures de la force maximale isométrique des quadriceps seront réalisées via un dynamomètre manuel par des évaluateurs en aveugle. Pour la réalisation de ces mesures, les évaluateurs suivront chaque étape du protocole de mesure décrit en Annexe XII.

Les meilleures valeurs de force obtenues par cette évaluation seront retenues et converties en Kg afin de calculer le LSI de la manière suivante :

$$LSI = \frac{\text{Force maximale membre opéré (Kg)}}{\text{Force maximale du membre non-opéré}} \times 100$$

4.2.2 Traitement des données

4.2.2.1 Caractéristiques générales de l'échantillon

Les informations relatives aux caractéristiques générales des participants seront renseignées sur un tableur Excel. Ces informations concernent l'âge, la taille, le poids, l'IMC ainsi que le type de greffe. Pour les types de greffe, un prélèvement d'ischio-jambiers sera codé 0, un prélèvement du tendon rotulien sera codé 1, et tout autre type de prélèvement sera codé 2.

4.2.2.2 Critères de reprise

Après réalisation des tests, si les critères de reprise de course à pied sont remplis, l'autorisation de reprise sera accordée (codée 1). A l'inverse, si les critères de reprise ne sont pas remplis, l'autorisation de reprise ne sera pas accordée (codée 0). Les résultats seront renseignés dans un tableur Excel et exprimés dans le tableau ci-dessous :

	Groupe contrôle	Groupe test
Autorisation de reprise		
Oui
Non

La reprise de la course à pied sera autorisée si les sujets obtiennent un LSI > 85% sur les *Hops Test* et s'ils obtiennent un LSI > 80% à l'évaluation de la force musculaire isométrique des quadriceps. Les protocoles de réalisation des tests et de calcul des LSI sont respectivement décrits en Annexe IV et en Annexe XII.

4.2.3 Analyse statistique

Les caractéristiques générales des sujets seront décrites pour les 2 groupes à l'aide des paramètres usuels (Moyenne, écart-type). Ces informations concernent l'âge, la taille, le poids, l'IMC ainsi que le type de greffe.

	Groupe contrôle	Groupe test
Age	.../...	.../...
Taille	.../...	.../...
Poids	.../...	.../...
IMC	.../...	.../...
Greffe		
– KJ	.../...	.../...
– DIDT	.../...	.../...

Une analyse statistique descriptive sera ensuite réalisée afin de comparer l'homogénéité de ces 2 groupes.

Un test de corrélation sera mené afin de vérifier la relation entre l'utilisation du BFR et la validation des critères de reprise de course à pied.

4.2.4 Faisabilité de l'étude

4.2.4.1 Conformité aux pratiques

Ce protocole de recherche est conçu à partir des recommandations de bonnes pratiques, concernant tout d'abord la prise en charge du ligament croisé opéré. En effet, les étapes et exercices proposés dans cette étude sont respectueux des principes et des objectifs de la prise en charge post-opératoire du ligament croisé antérieur.

Ensuite, ce protocole prend également en compte les recommandations d'utilisation du BFR. Le respect de ces recommandations permet une utilisation optimale et sécurisée.

Enfin, ce protocole est conforme aux pratiques éthiques liées à la recherche. L'inclusion des patients à l'étude se fait après l'obtention de leur consentement libre et éclairé. Les sujets inclus sont également en droit de se retirer au cours de l'étude, sans

que cela n'impacte leur rééducation. La confidentialité des données personnelles et des résultats sera respectée.

Cependant, ce protocole d'étude n'a pour le moment pas été soumis à un CPP (comité de protection des personnes).

4.2.4.2 Les ressources

a) Ressources humaines

D'une part, la participation à cette étude est proposée à des masseurs-kinésithérapeutes libéraux, prenant en charge une patientèle sportive (du moins une partie) en pré- et post-opératoire. Ces masseurs-kinésithérapeutes sont donc familiers à la rééducation du LCA opéré.

b) Ressources matérielles

D'autre part, cette étude ne nécessite qu'un faible apport en matériel. En effet, le protocole est construit à partir du matériel de base, typiquement présent dans les structures prenant en charge des sportifs (ou non): table d'examen, vélo d'appartement, press à jambe non-inclinée (*Leg Press*) ainsi qu'une machine de *Leg Extension*.

La réalisation de cette étude demande toutefois du matériel plus spécifique comme le dynamomètre manuel et le BFR.

L'évaluation de la force musculaire du quadriceps nécessite d'utiliser un dynamomètre manuel. C'est une alternative fiable et bien moins coûteuse que l'isocinétisme. Cet outil, en plus d'être plus accessible financièrement que le dynamomètre isocinétique, nécessite une organisation logistique moindre et pas de qualifications particulières.

La mise en place du BFR via un système de doppler automatisé est simple et relativement intuitive.

4.2.4.3 Les critères de jugement

Les critères de jugement pour répondre à l'objectif de cette étude sont basés sur le calcul de l'index de symétrie des membres. Ce ratio de symétrie est obtenu après réalisation des *Hops Tests*, mais aussi après la mesure de la force maximale isométrique des extenseurs des genoux.

La réalisation des *Hops tests* est simple, rapide et ne demande pas de matériel spécifique hormis un espace dégagé de 6 mètres et un mètre ruban pour mesurer la distance réalisée. La mise en place de ces 2 tests fonctionnels suit un protocole précis et détaillé disponible en Annexe IV.

Le calcul du LSI à partir du pic de force des quadriceps est possible avec un dynamomètre manuel. L'utilisation d'un dynamomètre manuel n'impose pas d'importantes contraintes logistiques, et ne nécessite que peu de compétences particulières de la part des évaluateurs. L'obtention du LSI de force suit aussi un protocole standardisé disponible en Annexe XII.

Au vu de ces résultats sur la faisabilité de ce protocole, aucun obstacle majeur n'est relevé. Une étude des effets du BFR sur la reprise de course à pied basée sur ce protocole est tout à fait réalisable.

5 Discussion

L'objectif de ce mémoire était d'explorer les effets du BFR sur la rééducation post-opératoire des individus opérés du LCA, et plus particulièrement sur la reprise de la course à pied. Ce travail révèle que la littérature n'apporte pas de réponses concrètes concernant les effets du BFR sur la reprise de course. C'est pourquoi j'ai voulu employer une méthodologie double, en réalisant tout d'abord un état des lieux de littérature concernant le BFR et la rééducation du LCA, pour ensuite proposer un protocole de recherche ciblé sur la reprise de course à pied.

Dans cette partie discussion, je vais m'attacher à analyser et discuter les données de la littérature concernant l'utilisation du BFR dans la prise en charge du LCA opéré ainsi que les limites. Dans un deuxième temps, je mettrai en avant l'intérêt de réaliser une étude spécifiquement orientée sur la reprise de course, avec ses éventuelles limites. Enfin, il s'agira dans cette dernière partie de vérifier nos hypothèses de départ.

5.1 Les données de la littérature

Les principaux résultats de cette revue sont que les protocoles mis en place dans les études sont hétérogènes, et que l'utilisation du BFR semble avoir une influence positive sur différents paramètres dans la rééducation du LCA opéré.

5.1.1 Hétérogénéité des protocoles

Nos résultats montrent que les protocoles mis en place par les différentes études de cette revue sont très variables. Ce constat est en adéquation avec celui mentionné dans une récente revue systématique menée par Lu et al (270). Ces variabilités s'observent sur différents points.

Premièrement, le déroulement des études ne se fait pas sur les mêmes périodes. Dans cette revue, les durées de réalisation des études sont comprises entre 45 minutes et 16 semaines. Toutes ces études ont une durée différente, ce qui rend la comparaison de leur résultat difficile.

Deuxièmement, les moyens de détermination de l'occlusion ne sont pas tous similaires. En effet, certaines études déterminent une occlusion en pourcentage du LOP, suite à une évaluation individualisée du sujet (231,233,249,254), tandis que d'autres appliquent une pression unique à chaque individu (217,268,269). Ces différentes modalités de détermination et application de l'occlusion sont très présentes dans la littérature concernant le BFR en général. L'utilisation d'un niveau de pression unique, non déterminé de manière individuelle est contradictoire avec les recommandations d'utilisation du BFR. En effet, il est recommandé que la pression d'occlusion individuelle soit calculée à partir d'un pourcentage du LOP (194,198,255), étant donné que le niveau de pression nécessaire à l'occlusion dépend de chaque individu (263,271,272). Ce niveau de pression résulte de la longueur et de la circonférence du membre (273), de la tension artérielle (263,273) et également de la position de l'utilisateur (253,261). Il est important d'également prendre en compte les caractéristiques liées au matériel, puisqu'elle aussi ont une influence sur l'occlusion (263,274). Par exemple, pour une même occlusion, un brassard plus large nécessite d'être moins gonflé qu'un brassard de plus petite taille (275,276). La composition du brassard semble aussi jouer un rôle déterminant, mais reste pour le moment peu étudiée (277). Il est donc important de considérer l'ensemble de ces caractéristiques puisqu'un même niveau de pression n'aura pas les mêmes effets sur l'occlusion d'un individu à un autre (263,272–274,278,279). L'application d'un niveau de pression personnalisée et individualisée est aussi un gage de sécurité (194,255). Ici, les études qui appliquent une pression d'occlusion personnalisée travaillent à 50% (254) et 80% du LOP (231,233,249), ce qui concorde avec les recommandations actuelles. Il est aujourd'hui recommandé d'appliquer un niveau d'occlusion minimum de 50% du LOP afin de produire un minimum d'effets, et de ne pas dépasser les 80% du LOP afin de garantir la sécurité des utilisateurs (194). Les recommandations naissantes autour de l'utilisation de BFR sont encore peu retrouvées dans la littérature, à l'image de notre revue. Mais un consensus général autour d'une pression d'occlusion individualisée se dégage, permettant de travailler efficacement et en toute sécurité.

Troisièmement, les modalités d'exercice sont variables. En effet, les études de notre revue ajoutent au BFR une résistance supplémentaire (231,233,249,268) alors que d'autres non (217,268,268), et certaines l'associent également à des exercices de marche (254,268). Parmi ces études ajoutant une résistance, certaines la définissent à

partir d'un pourcentage de la 1RM (233,249), d'autres appliquent une résistance unique, pouvant être augmentée progressivement. Cette résistance supplémentaire n'est parfois pas clairement définie (254). Il est important de définir un niveau de charge adapté, et le définir à partir d'un pourcentage de la 1RM nous apparaît comme la meilleure option. Cette modalité est d'ailleurs fréquemment retrouvée dans la littérature, et respecte les recommandations établies par l'ACSM (3).

Finalement, je constate à travers cette revue que les protocoles utilisés sont variables. Cette hétérogénéité est retrouvée dans la littérature autour du BFR au général. Il est important de suivre les recommandations pour améliorer la fiabilité des résultats mais aussi et surtout pour garantir la sécurité des sujets.

5.1.2 Impact du BFR sur la rééducation du LCA opéré

L'une des informations intéressantes de cette revue est que le BFR+LL semble avoir un effet bénéfique sur les douleurs de genou (231,233,249). Korakakis et al observent une diminution du seuil de douleur immédiatement après utilisation du BFR, mais observent également que cette diminution se maintient pendant au moins 45 minutes. Hughes et al se sont eux aussi intéressés à l'évaluation des douleurs de genou après utilisation du BFR, et constatent que les douleurs de genou sont plus faibles, cette fois 24h après l'utilisation du BFR. Dans une autre étude, Hughes et al observent que cette diminution des douleurs est présente immédiatement et 24h après l'exercice, mais que ces résultats se maintiennent sur 8 semaines. Bien que cette diminution ne soit pas à chaque fois significative, le BFR permet de diminuer les douleurs de genoux. Ces observations sont similaires à celles retrouvées dans la revue systématique menée par Hughes et al (209). D'ordinaire, il est admis que l'exercice a un effet hypoalgésique : on parle alors d'hypoalgésie induite par l'exercice (EIH) (280,281). Mais cette hypothèse ne permet pas de justifier que le BFR permette une diminution des douleurs plus importantes que l'entraînement à charge lourde (70% RM). Cette diminution s'expliquerait plutôt par l'utilisation des charges moins importantes (30% 1RM), diminuant ainsi les contraintes exercées (215). Néanmoins, les effets du BFR sur les mécanismes physiologiques de la douleur restent encore à explorer.

Les douleurs musculaires sont aussi explorées dans cette revue. Immédiatement après l'entraînement, ces douleurs sont significativement plus élevées pour le groupe BFR, comparé au groupe travaillant à charge lourde (249). Hughes et al confirment ce

résultat dans une seconde étude, où cette différence est également significative (233). Le BFR entraîne plus de douleurs musculaires que le renforcement musculaire à charge lourde. D'autres études mettent en avant le fait que le BFR soit responsable d'inconfort musculaire (236,237,282). Cet inconfort musculaire semble dû à l'accumulation de métabolite liée à l'occlusion (283). Plus l'occlusion est importante, plus les métabolites s'accumulent, augmentant ainsi les douleurs musculaires (284). Néanmoins, il est important de noter que ces douleurs sont présentes après les sessions d'entraînements, mais qu'elles disparaissent en quelques jours de leur propre chef (236–238).

Il faut savoir que la manière dont l'entraînement sous occlusion vasculaire est perçue est importante, puisqu'elle peut limiter son utilisation (285). L'effort perçu avec l'entraînement BFR+LL est supérieur au travail à LL simple (286). Néanmoins, aucune différence significative n'est observée entre l'utilisation du BFR et le renforcement standard à charge lourde chez des individus opérés du LCA (233,249). L'effort perçu semble similaire. La même constatation est faite chez des populations saines, où la perception de l'effort liée au BFR n'est pas plus importante qu'un travail à charge lourde (250,287). A noter qu'aucune atténuation de la perception de l'effort n'est observée dans notre étude, ce qui apparaît contradictoire avec d'autres études, comme celle de Martín-Hernandez et al (285). Toutefois, cette atténuation pourrait s'expliquer par le fait que le niveau de charge ne soit pas ajusté en cours d'étude, mais également par une détermination non-individuelle du niveau d'occlusion (233). En effet, la perception de l'effort est influencée par le niveau de charge (% 1RM), mais également par le niveau d'occlusion (% du LOP) (284,288). Mais d'autres études suggèrent que cette diminution des réponses perceptuelles avec le BFR se ferait par habitude (252,289,290). Il y aurait donc un phénomène d'adaptation qui améliorerait la tolérance au BFR (291).

Bon nombre d'études explorent les effets du BFR sur la trophicité musculaire dans des populations saines (210,211), mais également dans des populations cliniques (209). Ohta et al constatent ici que l'utilisation du BFR permet une amélioration significative de la trophicité des extenseurs de genou comparé à un simple travail à faible charge (268). Dans une autre étude, Kilgas et al montrent que cette récupération de la trophicité est aussi possible plusieurs années après l'opération (254). Cependant, la récupération de la trophicité n'est pas jugée significative par Iversen et al, ce qui

apparaît contradictoire à d'autres études (5,221). Une détermination non-individuelle de l'occlusion pourrait être à l'origine de cette divergence de résultats, mais cette différence pourrait aussi s'expliquer par le choix d'évaluer la récupération de trophicité par une mesure de l'ACSA. En effet, il a été montré que l'étude du volume musculaire serait plus adaptée pour évaluer cette composante (292). A noter que Ohta et al ont pourtant eux aussi étudié l'ACSA. Il est important de souligner que les données de la littérature sont contradictoires concernant les effets sur la trophicité. Comme le montre la revue systématique de Hughes et al (209), certaines études jugent que le BFR permet une récupération de trophicité musculaire similaire à celle d'un travail à charge lourde, tandis que d'autres montrent que cette récupération reste inférieure. Il n'y a pour l'heure pas de consensus. Toujours est-il que le BFR permet une meilleure récupération qu'un simple travail à charge légère (209). D'autres études sont nécessaires pour approfondir les effets du BFR sur la trophicité musculaire et les mécanismes qui en découlent (268).

Au même titre que la trophicité, la force musculaire est le paramètre le plus étudié concernant le BFR. Dans notre revue, il apparaît que l'utilisation du BFR après la reconstruction du LCA permet une récupération significative de la force musculaire des fléchisseurs et extenseurs de genou, contribuant ainsi à l'amélioration du LSI (268). La récupération de la force musculaire se fait également plusieurs années après l'opération comme le montrent Kilgas et al (254). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par la méta-analyse de Hughes et al (209). Cette analyse nous donne un aperçu des effets du BFR sur la force musculaire. Il en ressort que le BFR permet un gain de force supérieur au travail à charge légère seule mais que, pour le moment, ces gains semblent moins importants que ceux obtenus par un travail à charge lourde (217). Néanmoins, les avis restent contradictoires dans la littérature vis-à-vis de l'efficacité du BFR par rapport au travail à charge lourde. En s'intéressant aux protocoles de certaines études, cette hétérogénéité des résultats pourrait s'expliquer par l'absence de progression des charges de travail dans près de la moitié des études (209). . On constate également à travers notre revue que le BFR est également utilisé en pré-opératoire, dans l'objectif de prévenir la perte de force musculaire. En effet, l'étude de Zargi et al montre que la réalisation d'un « pré-conditionnement » avec le BFR permet de limiter la perte de l'endurance musculaire, au moins pendant les premières semaines suivant l'opération. Le BFR semble cependant ne pas avoir d'effet significatif sur la préservation de la force

maximale volontaire du quadriceps. Ces résultats sont en adéquation avec d'autres études (293).

Toujours est-il que le BFR apparaît comme une modalité d'intervention sûre, plus efficace qu'un travail à charge légère et mieux toléré qu'un travail à charge lourde, ce qui présente un réel intérêt dans ce contexte de rééducation post-opératoire.

5.1.3 Limites de la revue

Cette revue de littérature présente toutefois quelques limites. Tout d'abord, il s'agit d'une revue non-systématique, réalisée donc que par un seul individu. Certaines études ont pu ne pas être incluses, ce qui présente un biais de recherche évident. Comme indiqué en Figure 9, certaines études n'ont pas pu être incluses à cette revue étant donné qu'elles n'étaient pas disponibles en version intégrale et/ou en cours de réalisation, ce qui limite l'acquisition de résultat. A noter toutefois que les résultats de mon étude sont similaires à ceux d'une récente revue systématique de 2020 menée par Lu et al (270).

Ensuite, les études sont très hétérogènes. Bien que le BFR soit de plus en plus documenté dans la littérature scientifique, le nombre d'études sérieuses est encore limité. Les protocoles appliqués sont variables, ce qui nécessite d'analyser les résultats de cette revue avec précaution.

Enfin, les résultats obtenus par ce travail de recherche ne me permettent pas d'apporter les éléments de réponses escomptés. Parmi les études de cette revue, aucune ne s'intéresse directement aux critères de reprise de course à pied.

5.1.4 Effets supposés sur la reprise de course

Les douleurs de genou sont fréquentes après une ligamentoplastie, et peuvent compliquer la rééducation (294). Les causes de ces douleurs sont multiples, mais ont surtout d'importantes conséquences sur le contrôle moteur et la fonction musculaire (295,296). En effet, il existe une corrélation entre l'intensité de la douleur et le développement de force musculaire (296) : les douleurs de genou viennent diminuer le pic de force musculaire du quadriceps et des ischios-jambiers, et entraînent des modifications du contrôle moteur. La douleur a donc une influence négative sur ces deux paramètres, qui font partie des critères de reprise de course à pied. Or, nous avons vu précédemment que le BFR permet de diminuer ces douleurs de genou, et que cette

diminution se maintient dans le temps. En constatant cela, je suis en droit de supposer que le BFR, en agissant sur les douleurs de genou, permet de limiter ses effets sur la fonction musculaire et le contrôle moteur, tous deux étant des paramètres évalués lors de la réalisation des tests de reprise de course à pied.

L'un des enjeux majeurs en vue de la reprise de course à pied est la récupération de force musculaire. Là où le travail à charge lourde n'est dans un premier temps pas possible, le BFR est une option intéressante. Comme évoqué précédemment dans ce travail, le BFR est efficace pour la récupération de la force musculaire après une reconstruction du LCA. La récupération de la force musculaire est importante pour améliorer l'état fonctionnel du genou et la performance (297). En sachant que les critères de reprise de courses reposent sur une évaluation de la force et une évaluation fonctionnelle, cela nous laisse penser que le BFR pourrait tout à fait avoir une influence sur la décision de reprise de course à pied.

Mais les données de la littérature sont, à l'heure actuelle, insuffisantes pour que cette hypothèse soit vérifiée ou invérifiée. De fait, la mise en place du protocole proposé dans ce mémoire permettrait d'apporter les éléments de réponses nécessaires à la vérification de cette hypothèse.

5.2 BFR et reprise de course à pied

Cette étude est, à ma connaissance, la première qui s'attache à explorer les effets du BFR sur la reprise de course à pied après une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur.

5.2.1 Justification des choix

5.2.1.1 Niveau d'activité

Plusieurs facteurs ont une influence sur le retour au sport. C'est le cas du niveau d'activité pré-lésionnel (103). En effet, le niveau sportif d'avant la rupture a une influence sur la reprise du sport après la reconstruction. L'influence du niveau sportif pré-lésionnel n'est pas jugée significative sur la reprise du sport en général, mais plutôt sur la reprise du sport à un niveau similaire à celui d'avant la rupture du LCA (298). La

reprise du sport en fonction des différents niveaux de pratiques est représentée par le diagramme suivant :

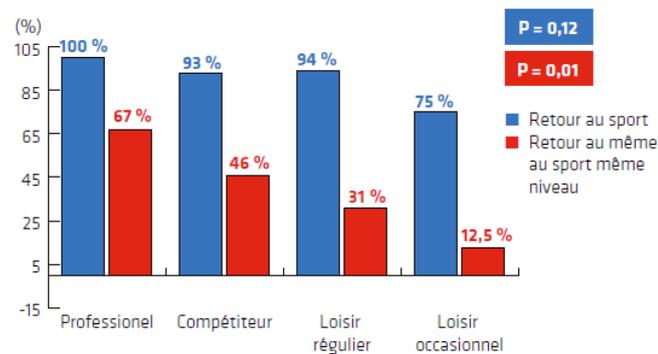


Figure 11 : Retour au sport en fonction du niveau (Gerometta et al, 2014)

Dans cette étude menée par la SFTS (société française de traumatologie du sport), il apparaît que plus le niveau de pratique est élevé, plus le taux de retour au sport au même niveau est important. D'autres études confirment cette influence du niveau sportif (105,299). Afin d'avoir un échantillon homogène et de limiter les biais d'interprétation des résultats, j'ai donc choisi de n'inclure que des individus ayant un score de Tegner >7 (sport de pivot/contact en compétition). Nous aurions également pu compléter cette définition du niveau d'activité pré-lésionnel par le score de Marx (108).

5.2.1.2 Détermination de la 1RM

Les programmes de renforcement musculaire sont généralement établis à partir de pourcentage de la force musculaire maximale : 1RM. Cette 1RM désigne la charge la plus lourde que l'on ne peut soulever qu'une fois. Considérée comme le gold standard de l'évaluation de la force musculaire hors laboratoire (300), cette technique nécessite de réaliser un effort maximal, et n'est donc pas adaptée aux populations cliniques (301). Il existe toutefois d'autres modalités d'estimation de la 1RM à partir d'effort sous-maximaux. C'est-à-dire qu'il est possible d'estimer la 1RM en calculant la 5 ou 10RM par exemple. Cette estimation basée sur les efforts sous-maximaux est une alternative pratique, mais également précise (301).

Différentes équations prédictives existent pour estimer cette 1RM à partir de répétitions multiples (5RM, 10RM, 20RM,...). En ce qui concerne l'estimation de la 1RM sur *Leg Press*, Reynolds et al montrent que c'est la 5RM qui permet l'estimation la plus précise (301). A partir de ce nombre de répétitions, il existe différentes équations

pour prédire la 1RM. Néanmoins, toutes ces équations n'ont pas le même niveau de précision. Une étude de 2006 compare les niveaux de précision de ces équations, et montre que l'équation de Reynolds et celle de Abadie sont les plus précises pour estimer la 1RM sur la *Leg Press* (301). Bien que ces techniques d'estimation de la 1RM à partir d'effort sous-maximaux soient pratiques, elles demandent une certaine rigueur méthodologique. En effet, une erreur de plus ou moins 5Kg dans le calcul de la 5RM entraîne un important décalage entre l'estimation et la véritable valeur de la 1RM (301).

La 1RM est spécifique à chaque type d'exercice, nous proposons donc de la déterminer pour chacune des modalités de renforcement utilisées dans mon étude, à savoir sur la *Leg press* et la *Leg extension*. Ces deux machines sont d'ailleurs fréquemment utilisées dans la recherche en ce qui concerne les évaluations de force musculaire du genou(301). A noter que le dynamomètre manuel peut également être utilisé pour déterminer la 1RM sur *Leg Extension* par exemple, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour savoir si cette modalité est applicable à des populations cliniques (302).

5.2.1.3 Volume de travail

Le volume de travail désigne ici la quantité de travail musculaire effectuée en une session de renforcement. Ce volume a une influence directe sur les adaptations musculaires. Pour gagner en force musculaire, l'ACSM recommande de travailler à 60-70% de la 1RM, sur 1 à 3 séries de 8 à 12 répétitions (3) . L'utilisation du BFR présente l'avantage de ne pas utiliser des résistances aussi élevées. Toutefois, il est recommandé de travailler sur un nombre de répétitions plus important. Scott et al justifient cette utilisation d'un volume de travail plus important par la relation inverse entre intensité et nombre de répétitions (194). En suivant cette notion, des études utilisent le BFR en travaillant jusqu'à l'échec musculaire. Toutefois, cette modalité de répétition jusqu'à l'échec n'est pas nécessaire pour gagner en force et en trophicité musculaire (210). De plus, travailler jusqu'à l'échec suggère un effort maximal, ce qui n'est pas nécessairement adapté à des contextes cliniques comme certaines prises en charge post-opératoires. Les études sur le BFR utilisent généralement un nombre de répétition compris entre 45 et 75, classiquement réparti en 4 sous-ensembles: 30, 15, 15 ,15 (194,303). C'est pour ces différentes raisons que, dans mon étude, les modalités de

renforcement en terme de séries et répétions sont différentes entre le groupe contrôle et le groupe test.

5.2.2 Limites de l'étude

5.2.2.1 La grille d'indentification des risques

Le questionnaire utilisé lors de l'inclusion (Annexe V) des sujets à l'étude n'est pas validé. Bien que son utilisation soit recommandée afin de limiter voire d'éviter les évènements indésirables, et ainsi assurer la sécurité des utilisateurs du BFR, il n'y a à ce jour aucune étude vérifiant la validité de cette grille d'évaluation. L'utilisation d'un questionnaire validé permettrait d'améliorer la qualité méthodologique de notre étude.

5.2.2.2 La prise en charge du LCA

Plusieurs masseurs-kinésithérapeutes sont amenés à participer à cette étude. Même si ces investigateurs sont familiers à la prise en charge du LCA opéré, ils n'ont pas tous les mêmes habitudes et préférences de prise en charge. En effet, même si les recommandations internationales sont de bonne qualité, leur mise en application est encore trop hétérogène (102). Il existe un biais évident en fonction des habitudes et préférences de chaque thérapeute, ce qui peut avoir une influence sur le déroulement global de l'étude et sur les résultats obtenus aux tests de reprise de course. Le tableau de synthèse de la prise en charge du LCA opéré en Annexe II s'adresse aux thérapeutes souhaitant participer à l'étude, et vise à limiter ce biais en proposant une trame rééducative commune.

5.2.2.3 L'index de symétrie des membres

Dans le cadre du calcul du LSI, tant pour les *Hop tests* que pour la force du quadriceps, le membre non opéré (membre « sain ») est utilisé en tant que norme de référence. Cependant, l'utilisation du membre sain comme référence peut être remise en cause. Après une rupture du LCA, des déficits de forces bilatéraux sont observés (304). La récupération fonctionnelle et musculaire des membres inférieurs peut dans ce cas être surestimée. En ce sens, des études commencent à remettre en cause la validité du LSI dans le cadre du retour au sport (305). Ce constat est également applicable à la reprise de course à pied. L'utilisation de l'index de symétrie des membres reste cependant recommandée dans le suivi de la rééducation du LCA opéré, et est très présente dans la littérature.

5.3 Retour sur les hypothèses

En amont de ce travail, j'ai émis différentes hypothèses.

➤ Le BFR permet d'optimiser la rééducation post-opératoire du LCA :

Les résultats de ce travail mettent en lumière les effets du BFR sur des sujets opérés du LCA. Nous remarquons que le BFR a une influence positive sur plusieurs paramètres comme la douleur, la force ou encore la trophicité musculaire. Néanmoins, il serait plus judicieux de mieux définir cette notion « d'optimisation ». Le BFR permet-il d'accélérer la prise en charge ? De reprendre plus rapidement la course à pied ? De gagner plus efficacement en force musculaire ? De causer moins de complications qu'une prise en charge standard (douleur, épanchement,...) ? Cette hypothèse sous-entend donc de nombreuses questions. Bien que certains développeurs considèrent le BFR comme un outil permettant d'optimiser la rééducation, il est nécessaire de mieux définir ce point avant de prétendre pouvoir confirmer cette hypothèse.

➤ Le BFR optimise la reprise de course à pied après une opération du LCA :

Cette hypothèse n'est pas vérifiée pour le moment. Ma revue de littérature permet de mettre en lumière les influences positives du BFR sur les douleurs de genou et la récupération de force musculaire. Ces résultats permettent de développer et d'apporter des arguments supplémentaires (cf 5.1.4), mais ne permettent pas de vérifier cette hypothèse. La mise en place de l'étude que nous avons proposée dans ce travail permettrait d'apporter les éléments de réponses nécessaires concernant l'efficacité du BFR sur la validation des critères de reprise de course à pied.

6 Conclusion

Le chemin vers la reprise du sport après une reconstruction du ligament croisé antérieur est long. La rééducation se fait de manière progressive en validant certaines étapes comme la reprise de course à pied. Cette reprise nécessite de valider certains critères, basés sur l'évaluation fonctionnelle et l'évaluation de la force des membres inférieurs. Le BFR est une modalité de renforcement musculaire qui est de plus en plus utilisée en rééducation, et apparaît efficace sur la récupération de force musculaire ainsi que sur d'autres paramètres. L'objectif de ce mémoire était de savoir **en quoi le BFR peut-il avoir un effet sur la reprise de la course à pied chez des sportifs opérés du ligament croisé antérieur**

Ma revue de littérature montre que le BFR présente de réels intérêts après une reconstruction du ligament croisé antérieur, en ce qui concerne la récupération de force musculaire et la diminution des douleurs de genou. Cependant, aucune étude ne s'intéresse directement aux critères de reprise de course à pied. C'est pourquoi j'ai proposé un protocole permettant de pallier aux manques de la littérature concernant l'utilisation du BFR et la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA.

L'impact du BFR sur les critères de reprise de course à pied n'a, à ce jour, jamais été étudié. Cela peut s'expliquer par le caractère émergent de cette technique. C'est pourquoi mon étude présente un réel intérêt, et permettrait d'apporter des éléments de réponses concrets.

L'utilisation du BFR en rééducation tend aujourd'hui à se généraliser, et présente une alternative intéressante au renforcement à charge lourde. Ce travail m'a permis de développer mes compétences en recherche et de porter un regard critique sur l'utilisation du BFR. Ayant déjà eu l'occasion de l'utiliser en rééducation, je continuerai de me tenir informé des dernières publications et recommandations sur le sujet afin de toujours proposer une prise en charge optimale à mes futurs patients opérés du ligament croisé antérieur.

Bien que les études soient encore peu nombreuses, le BFR pourrait tout à fait être applicable à d'autres pathologies, comme par exemple les fractures du plateau tibial.

7 Références

1. Prise en charge thérapeutique des lésions méniscales et des lésions isolées du ligament croisé antérieur du genou chez l'adulte. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Appareil Moteur*. déc 2008;94(8):787-91.
2. Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*. juin 1990;18(3):292-9.
3. American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc*. mars 2009;41(3):687-708.
4. ZAFFAGNINI S, GRASSI A, SERRA M, MARCACCI M. Return to sport after ACL reconstruction: how, when and why? A narrative review of current evidence. *Joints*. 8 juin 2015;3(1):25-30.
5. Takarada Y, Takazawa H, Sato Y, Takebayashi S, Tanaka Y, Ishii N. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *J Appl Physiol*. juin 2000;88(6):2097-106.
6. Wilk KE. Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention and Rehabilitation: Let's Get It Right. *J Orthop Sports Phys Ther*. 30 sept 2015;45(10):729-30.
7. Tamalet B, Rochcongar P. Épidémiologie et prévention de la rupture du ligament croisé antérieur du genou. *Revue du Rhumatisme Monographies*. 1 avr 2016;83(2):103-7.
8. Miyasaka, Daniel, Stone, Hirschman. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg*. 1991;4:43-8.
9. Agel J, Arendt EA, Bershadsky B. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med*. avr 2005;33(4):524-30.
10. Roos H, Ormell M, Gärdsell P, Lohmander LS, Lindstrand A. Soccer after anterior cruciate ligament injury--an incompatible combination? A national survey of incidence and risk factors and a 7-year follow-up of 310 players. *Acta Orthop Scand*. avr 1995;66(2):107-12.
11. Anatomie de l'appareil locomoteur-Tome 1 Mem... | Elsevier Masson [Internet]. [cité 20 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.elsevier-masson.fr/anatomie-de-lappareil-locomoteur-tome-1-membre-inferieur-9782294745027.html>
12. Odensten M, Gillquist J. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. *J Bone Joint Surg Am*. févr 1985;67(2):257-62.
13. Pathologie ligamentaire du genou - Philippe Landreau,Pascal Christel,Patrick Djian [Internet]. [cité 20 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.decite.fr/livres/pathologie-ligamentaire-du-genou-9782287597336.html>
14. Amis AA, Scammell BE. Biomechanics of intra-articular and extra-articular reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br*. sept 1993;75(5):812-7.
15. Quelard B, Rachet O, Sonnery-Cottet B, Chambat P. Rééducation postopératoire des greffes du ligament croisé antérieur. *EMC - Kinésithérapie - Médecine physique - Réadaptation*. janv 2010;6(3):1-16.
16. Livesay GA, Rudy TW, Woo SL, Runco TJ, Sakane M, Li G, et al. Evaluation of the effect of joint constraints on the in situ force distribution in the anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*. mars 1997;15(2):278-84.
17. Sakane M, Fox RJ, Glen SL-YW, Livesay A, Li G, Fu FH. In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *Journal of Orthopaedic Research*. 1997;15(2):285-93.
18. Zantop T, Herbort M, Raschke MJ, Fu FH, Petersen W. The Role of the Anteromedial and Posterolateral Bundles of the Anterior Cruciate Ligament in Anterior Tibial Translation and Internal Rotation: The American Journal of Sports Medicine [Internet]. 30 août 2017 [cité 1 avr 2020]; Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0363546506294571>

19. Markolf KL, Mensch JS, Amstutz HC. Stiffness and laxity of the knee--the contributions of the supporting structures. A quantitative in vitro study. *J Bone Joint Surg Am.* juill 1976;58(5):583-94.
20. Amis A, Bull A, Lie D. Biomechanics of Rotational Instability and Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Operative Techniques in Orthopaedics.* 31 janv 2005;15:29-35.
21. Logan M, Dunstan E, Robinson J, Williams A, Gedroyc W, Freeman M. Tibiofemoral Kinematics of the Anterior Cruciate Ligament (ACL)-Deficient Weightbearing, Living Knee Employing Vertical Access Open « Interventional » Multiple Resonance Imaging. *The American journal of sports medicine.* 1 avr 2004;32:720-6.
22. Bull AMJ, Earnshaw PH, Smith A, Katchburian MV, Hassan ANA, Amis AA. Intraoperative measurement of knee kinematics in reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* sept 2002;84(7):1075-81.
23. Yack HJ, Collins CE, Whieldon TJ. Comparison of closed and open kinetic chain exercise in the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med.* 1 janv 1993;21(1):49-54.
24. Henning CE, Lynch MA, Glick KR. An in vivo strain gage study of elongation of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med.* févr 1985;13(1):22-6.
25. Lutz GE, Palmitier RA, An KN, Chao EY. Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. *J Bone Joint Surg Am.* mai 1993;75(5):732-9.
26. Beynon BD, Fleming BC. Anterior cruciate ligament strain in-vivo: a review of previous work. *J Biomech.* juin 1998;31(6):519-25.
27. Steinkamp LA, Dillingham MF, Markel MD, Hill JA, Kaufman KR. Biomechanical considerations in patellofemoral joint rehabilitation. *Am J Sports Med.* juin 1993;21(3):438-44.
28. Duthon VB, Messerli G, Menetrey J. [Anterior cruciate ligament reconstruction: indications and techniques]. *Rev Med Suisse.* 17 déc 2008;4(184):2744-8.
29. Olsson O, Isacson A, Englund M, Frobell RB. Epidemiology of intra- and peri-articular structural injuries in traumatic knee joint hemarthrosis - data from 1145 consecutive knees with subacute MRI. *Osteoarthritis Cartilage.* 2016;24(11):1890-7.
30. Histoire naturelle du genou après rupture du ligament croisé antérieur chez l'adulte. 2004. 8-16 p. (Cahier d'enseignement de la sofcot; vol. 86a).
31. Pinheiro JP. Traitement conservateur de la rupture du ligament croisé antérieur. *Journal de Traumatologie du Sport.* déc 2007;24(4):222-6.
32. van Yperen DT, Reijman M, van Es EM, Bierma-Zeinstra SMA, Meuffels DE. Twenty-Year Follow-up Study Comparing Operative Versus Nonoperative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Ruptures in High-Level Athletes. *Am J Sports Med.* avr 2018;46(5):1129-36.
33. Fujimoto E, Sumen Y, Urabe Y, Deie M, Murakami Y, Adachi N, et al. An early return to vigorous activity may destabilize anterior cruciate ligaments reconstructed with hamstring grafts. *Arch Phys Med Rehabil.* févr 2004;85(2):298-302.
34. Hurley ET, Calvo-Gurry M, Withers D, Farrington SK, Moran R, Moran CJ. Quadriceps Tendon Autograft in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Arthroscopy.* 2018;34(5):1690-8.
35. Jm W, Is C, Aj C, La P. Endoscopic reconstruction for isolated anterior cruciate ligament rupture. *J Bone Joint Surg Br.* 1 mars 1998;80(2):288-94.
36. Nwachukwu BU, Voleti PB, Berkanish P, Chang B, Cohn MR, Williams RJ, et al. Return to Play and Patient Satisfaction After ACL Reconstruction: Study with Minimum 2-Year Follow-up. *J Bone Joint Surg Am.* 3 mai 2017;99(9):720-5.
37. Brophy RH, Schmitz L, Wright RW, Dunn WR, Parker RD, Andrich JT, et al. 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.* nov 2012;40(11):2517-22.

38. Baldassarri M, Perazzo L, Ghinelli D, Ricciarelli M, Pilla F, Buda R. Return to Sport after ACL Surgery: A Comparison between Two Different Reconstructive Techniques. *J Knee Surg.* juin 2019;32(06):513-8.
39. de Sa D, Shanmugaraj A, Weidman M, Peterson DC, Simunovic N, Musahl V, et al. All-Inside Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-A Systematic Review of Techniques, Outcomes, and Complications. *J Knee Surg.* oct 2018;31(9):895-904.
40. R V, A A, S I, V V. Current Trends in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Review. *Cureus* [Internet]. 13 nov 2015 [cité 20 mars 2020];7(11). Disponible sur: <https://www.cureus.com/articles/3376-current-trends-in-anterior-cruciate-ligament-reconstruction-a-review>
41. Prentice HA, Lind M, Mouton C, Persson A, Magnusson H, Gabr A, et al. Patient demographic and surgical characteristics in anterior cruciate ligament reconstruction: a description of registries from six countries. *Br J Sports Med.* juin 2018;52(11):716-22.
42. Belk JW, Kraeutler MJ, Purcell JM, McCarty EC. Autograft Versus Allograft for Posterior Cruciate Ligament Reconstruction: An Updated Systematic Review and Meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2018;46(7):1752-7.
43. Chen W, Li H, Chen Y, Jiang F, Wu Y, Chen S. Bone–Patellar Tendon–Bone Autografts Versus Hamstring Autografts Using the Same Suspensory Fixations in ACL Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med* [Internet]. 27 nov 2019 [cité 1 avr 2020];7(11). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6967236/>
44. Thompson SM, Salmon LJ, Waller A, Linklater J, Roe JP, Pinczewski LA. Twenty-Year Outcome of a Longitudinal Prospective Evaluation of Isolated Endoscopic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Patellar Tendon or Hamstring Autograft. *Am J Sports Med.* déc 2016;44(12):3083-94.
45. Rééducation en traumatologie du sport. Tome 2 | Elsevier Masson [Internet]. [cité 1 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.elsevier-masson.fr/reeducation-en-traumatologie-du-sport-tome-2-9782294017568.html>
46. Panni AS, Milano G, Lucania L, Fabbriani C. Graft healing after anterior cruciate ligament reconstruction in rabbits. *Clin Orthop Relat Res.* oct 1997;(343):203-12.
47. Tscholl P, Haldemann V, De Smet A, Gard S, Burgan R, Yerganyan V, et al. Comment choisir le type de greffe pour la reconstruction du ligament croisé antérieur? *Revue médicale suisse.* 12 juill 2017;13:1339-42.
48. Xie X, Liu X, Chen Z, Yu Y, Peng S, Li Q. A meta-analysis of bone-patellar tendon-bone autograft versus four-strand hamstring tendon autograft for anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee.* mars 2015;22(2):100-10.
49. Katabi M, Djian P, Christel P. [Anterior cruciate ligament reconstruction: patellar tendon autograft versus four-strand hamstring tendon autografts. A comparative study at one year follow-up]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* avr 2002;88(2):139-48.
50. Poehling-Monaghan KL, Salem H, Ross KE, Secrist E, Ciccotti MC, Tjoumakaris F, et al. Long-Term Outcomes in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review of Patellar Tendon Versus Hamstring Autografts. *Orthop J Sports Med.* juin 2017;5(6):2325967117709735.
51. Grassi A, Nitri M, Moulton SG, Marcheggiani Muccioli GM, Bondi A, Romagnoli M, et al. Does the type of graft affect the outcome of revision anterior cruciate ligament reconstruction?: a meta-analysis of 32 studies. *The Bone & Joint Journal.* juin 2017;99-B(6):714-23.
52. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clin J Sport Med.* mars 2012;22(2):116-21.
53. Webster KE, Feller JA, Leigh WB, Richmond AK. Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* mars 2014;42(3):641-7.
54. Rambaud A. Retour au sport après reconstruction du ligament croisé antérieur : apport de la course à pied [Internet]. <http://www.theses.fr>. 2018 [cité 20 mars 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/s142631>

55. van Melick N, van Cingel REH, Brooijmans F, Neeter C, van Tienen T, Hullegie W, 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.* déc 2016;50(24):1506-15.
56. Barber-Westin S, Noyes MD Frank. Factors Used to Determine Return to Unrestricted Sports Activities After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association.* 1 déc 2011;27:1697-705.
57. Claes S, Verdonk P, Forsyth R, Bellemans J. The « ligamentization » process in anterior cruciate ligament reconstruction: what happens to the human graft? A systematic review of the literature. *Am J Sports Med.* nov 2011;39(11):2476-83.
58. Amiel D, Kleiner JB, Roux RD, Harwood FL, Akeson WH. The phenomenon of « ligamentization »: anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon. *J Orthop Res.* 1986;4(2):162-72.
59. Wang JH-C, Jia F, Gilbert TW, Woo SL-Y. Cell orientation determines the alignment of cell-produced collagenous matrix. *J Biomech.* janv 2003;36(1):97-102.
60. Woo SL-Y, Abramowitch SD, Kilger R, Liang R. Biomechanics of knee ligaments: injury, healing, and repair. *Journal of Biomechanics.* janv 2006;39(1):1-20.
61. Noé N, Billuart F, Messina M, Nephtali J-L. Effets du travail musculaire sur le phénomène de ligamentisation. *Kinésithérapie, la Revue.* 1 avr 2010;10.
62. Glass R, Waddell J, Hoogenboom B. The Effects of Open versus Closed Kinetic Chain Exercises on Patients with ACL Deficient or Reconstructed Knees: A Systematic Review. *N Am J Sports Phys Ther.* juin 2010;5(2):74-84.
63. Falconiero RP, DiStefano VJ, Cook TM. Revascularization and ligamentization of autogenous anterior cruciate ligament grafts in humans. *Arthroscopy.* mars 1998;14(2):197-205.
64. Rambaud AJM, Semay B, Samozino P, Morin J-B, Testa R, Philippot R, 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.* 30 2017;7(6):e015087.
65. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. 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.* nov 2014;48(21):1543-52.
66. Burgi C, Peters S, Ardern C, Magill J, Gomez C, Sylvain J, et al. Which criteria are used to clear patients to return to sport after primary ACL reconstruction? A scoping review. *British Journal of Sports Medicine.* 2 févr 2019;53:bj sports-2018.
67. Abrams GD, Harris JD, Gupta AK, McCormick FM, Bush-Joseph CA, Verma NN, et al. Functional Performance Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthop J Sports Med [Internet].* 21 janv 2014 [cité 21 mars 2020];2(1). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC455525/>
68. Adams D, Logerstedt DS, Hunter-Giordano A, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression. *J Orthop Sports Phys Ther.* juill 2012;42(7):601-14.
69. 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.* sept 2011;39(3):100-10.
70. Kvist J. Rehabilitation following anterior cruciate ligament injury: current recommendations for sports participation. *Sports Med.* 2004;34(4):269-80.
71. Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, Miladi R, Witvrouw E. Likelihood of ACL graft rupture: Not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *British Journal of Sports Medicine.* 23 mai 2016;50:bj sports-2015.

72. Greenberg EM, Greenberg ET, Albaugh J, Storey E, Ganley TJ. Rehabilitation Practice Patterns Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Survey of Physical Therapists. *J Orthop Sports Phys Ther.* 22 mai 2018;48(10):801-11.
73. Ardern CL, Ekås G, Grindem H, Moksnes H, Anderson A, Chotel F, et al. 2018 International Olympic Committee consensus statement on prevention, diagnosis and management of paediatric anterior cruciate ligament (ACL) injuries. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* avr 2018;26(4):989-1010.
74. Dingenen B, Gokeler A. Optimization of the Return-to-Sport Paradigm After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Critical Step Back to Move Forward. *Sports Medicine.* 11 janv 2017;47.
75. Arna Risberg M, Lewek M, Snyder-Mackler L. A systematic review of evidence for anterior cruciate ligament rehabilitation: how much and what type? *Physical Therapy in Sport.* 1 août 2004;5(3):125-45.
76. WHO | International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) [Internet]. WHO. World Health Organization; [cité 21 mars 2020]. Disponible sur: <http://www.who.int/classifications/icf/en/>
77. Zaffagnini S, Grassi A, Marcheggiani Muccioli GM, Tsapralis K, Ricci M, Bragonzoni L, et al. Return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction in professional soccer players. *Knee.* juin 2014;21(3):731-5.
78. Della Villa S, Boldrini L, Ricci M, Danelon F, Snyder-Mackler L, Nanni G, et al. Clinical Outcomes and Return-to-Sports Participation of 50 Soccer Players After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Through a Sport-Specific Rehabilitation Protocol. *Sports Health.* janv 2012;4(1):17-24.
79. van Grinsven S, van Cingel REH, Holla CJM, van Loon CJM. Evidence-based rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1 août 2010;18(8):1128-44.
80. Hildebrandt C, Müller L, Zisch B, Huber R, Fink C, Raschner C. Functional assessments for decision-making regarding return to sports following ACL reconstruction. Part I: development of a new test battery. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* mai 2015;23(5):1273-81.
81. Benjaminse A, Otten E. ACL injury prevention, more effective with a different way of motor learning? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* avr 2011;19(4):622-7.
82. Tyler TF, McHugh MP, Gleim GW, Nicholas SJ. The effect of immediate weightbearing after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Orthop Relat Res.* déc 1998;(357):141-8.
83. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med.* avr 2005;33(4):492-501.
84. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, 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.* oct 2010;38(10):1968-78.
85. Swärd P, Kostogiannis I, Roos H. Risk factors for a contralateral anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* mars 2010;18(3):277-91.
86. Kruse LM, Gray B, Wright RW. Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *The Journal of Bone and Joint Surgery American volume.* 3 oct 2012;94(19):1737.
87. Berschin G, Sommer B, Behrens A, Sommer H-M. Whole Body Vibration Exercise Protocol versus a Standard Exercise Protocol after ACL Reconstruction: A Clinical Randomized Controlled Trial with Short Term Follow-Up. *J Sports Sci Med.* 1 sept 2014;13(3):580-9.
88. Liu-Ambrose T, Taunton JE, MacIntyre D, McConkey P, Khan KM. The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: a randomized clinical trial. *Scand J Med Sci Sports.* avr 2003;13(2):115-23.
89. Shaw T, Williams M, Chipchase L. Do early quadriceps exercises affect the outcome of ACL reconstruction? A randomised controlled trial. *The Australian journal of physiotherapy.* 1 févr 2005;51:9-17.

90. Sekir U, Gur H, Akova B. Early versus Late Start of Isokinetic Hamstring-Strengthening Exercise after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with Patellar Tendon Graft. *Am J Sports Med.* 1 mars 2010;38(3):492-500.
91. Risberg MA, Holm I. The Long-term Effect of 2 Postoperative Rehabilitation Programs After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Clinical Trial With 2 Years of Follow-Up. *Am J Sports Med.* 1 oct 2009;37(10):1958-66.
92. Risberg MA, Holm I, Myklebust G, Engebretsen L. Neuromuscular training versus strength training during first 6 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *Phys Ther.* juin 2007;87(6):737-50.
93. Langford JL, Webster KE, Feller JA. A prospective longitudinal study to assess psychological changes following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Br J Sports Med.* mai 2009;43(5):377-81.
94. Czuppon S, Racette BA, Klein SE, Harris-Hayes M. Variables Associated With Return to Sport Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Br J Sports Med.* mars 2014;48(5):356-64.
95. Everhart JS, Best TM, Flanigan DC. Psychological predictors of anterior cruciate ligament reconstruction outcomes: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1 mars 2015;23(3):752-62.
96. te Wierike SCM, van der Sluis A, van den Akker-Scheek I, Elferink-Gemser MT, Visscher C. Psychosocial factors influencing the recovery of athletes with anterior cruciate ligament injury: A systematic review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports.* déc 2012;n/a-n/a.
97. Thomeé P, Währborg P, Börjesson M, Thomeé R, Eriksson BI, Karlsson J. Determinants of self-efficacy in the rehabilitation of patients with anterior cruciate ligament injury. *J Rehabil Med.* juill 2007;39(6):486-92.
98. Lieber AC, Steinhaus ME, Liu JN, Hurwit D, Chiaia T, Strickland SM. Quality and Variability of Online Available Physical Therapy Protocols From Academic Orthopaedic Surgery Programs for Medial Patellofemoral Ligament Reconstruction. *Orthop J Sports Med [Internet].* 2 juill 2019 [cité 21 mars 2020];7(7). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6607570/>
99. Failla MJ, Arundale AJH, Logerstedt DS, Snyder-Mackler L. Controversies in knee rehabilitation: anterior cruciate ligament injury. *Clin Sports Med.* avr 2015;34(2):301-12.
100. Ellman MB, Sherman SL, Forsythe B, LaPrade RF, Cole BJ, Bach BR. Return to play following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Am Acad Orthop Surg.* mai 2015;23(5):283-96.
101. Logerstedt DS, Scalzitti D, Risberg MA, Engebretsen L, Webster KE, Feller J, et al. Knee Stability and Movement Coordination Impairments: Knee Ligament Sprain Revision 2017. *J Orthop Sports Phys Ther.* nov 2017;47(11):A1-47.
102. Andrade R, Pereira R, Cingel R van, Staal JB, Espregueira-Mendes J. How should clinicians rehabilitate patients after ACL reconstruction? A systematic review of clinical practice guidelines (CPGs) with a focus on quality appraisal (AGREE II). *Br J Sports Med [Internet].* 7 juin 2019 [cité 21 mars 2020]; Disponible sur: <https://bjsm.bmj.com/content/early/2019/06/07/bjsports-2018-100310>
103. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, Witvrouw E, Clarsen B, Cools A, et al. 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med.* juill 2016;50(14):853-64.
104. Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, Seil R, Padua D. Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* janv 2017;25(1):192-9.
105. Webster KE, Hewett TE. What is the Evidence for and Validity of Return-to-Sport Testing after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* juin 2019;49(6):917-29.
106. Goncharov EN, Koval OA, Dubrov VE, Bezuglov EN, Filimonova AM, Goncharov NG. Clinical experience with combined reconstruction of the anterior cruciate and anterolateral ligaments of the knee in sportsmen. *Int Orthop.* 2019;43(12):2781-8.

107. DELLA VILLA F, RICCI M, PERDISA F, FILARDO G, GAMBERINI J, CAMINATI D, et al. Anterior cruciate ligament reconstruction and rehabilitation: predictors of functional outcome. *Joints*. 31 janv 2016;3(4):179-85.
108. Marx RG, Stump TJ, Jones EC, Wickiewicz TL, Warren RF. Development and evaluation of an activity rating scale for disorders of the knee. *Am J Sports Med*. avr 2001;29(2):213-8.
109. Lacouture P, Colloud F, Decatoire A, Monnet T. Biomécanique de la course à pied. *Revue Encyclopédie Chirurgicale*. 1 avr 2013;9:22.
110. Myer GD, Paterno MV, Ford KR, Quatman CE, Hewett TE. Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: criteria-based progression through the return-to-sport phase. *J Orthop Sports Phys Ther*. juin 2006;36(6):385-402.
111. Herrington L, Myer G, Horsley I. Task based rehabilitation protocol for elite athletes following Anterior Cruciate ligament reconstruction: a clinical commentary. *Phys Ther Sport*. nov 2013;14(4):188-98.
112. Dauty M, Menu P, Dubois C. Effects of running retraining after knee anterior cruciate ligament reconstruction. *Ann Phys Rehabil Med*. avr 2010;53(3):150-61.
113. Roldán E, Reeves ND, Cooper G, Andrews K. In vivo mechanical behaviour of the anterior cruciate ligament: A study of six daily and high impact activities. *Gait & Posture*. 1 oct 2017;58:201-7.
114. Dyhre-Poulsen P, Krogsgaard MR. Muscular reflexes elicited by electrical stimulation of the anterior cruciate ligament in humans. *J Appl Physiol*. déc 2000;89(6):2191-5.
115. Solomonow M, Baratta R, Zhou BH, Shoji H, Bose W, Beck C, et al. The synergistic action of the anterior cruciate ligament and thigh muscles in maintaining joint stability. *Am J Sports Med*. juin 1987;15(3):207-13.
116. Limbird TJ, Shiavi R, Frazer M, Borra H. EMG profiles of knee joint musculature during walking: changes induced by anterior cruciate ligament deficiency. *J Orthop Res*. 1988;6(5):630-8.
117. Woods C, Hawkins R, Hulse M, Hodson A. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football-analysis of preseason injuries. *Br J Sports Med*. déc 2002;36(6):436-41; discussion 441.
118. Khayambashi K, Mohammadkhani Z, Ghaznavi K, Lyle MA, Powers CM. The effects of isolated hip abductor and external rotator muscle strengthening on pain, health status, and hip strength in females with patellofemoral pain: a randomized controlled trial. *J Orthop Sports Phys Ther*. janv 2012;42(1):22-9.
119. van Gent RN, Siem D, van Middelkoop M, van Os AG, Bierma-Zeinstra SMA, Koes BW. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review. *Br J Sports Med*. août 2007;41(8):469-80; discussion 480.
120. Amano K, Huebner JL, Stabler TV, Tanaka M, McCulloch CE, Lobach I, et al. 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*. 1 mars 2018;46(4):890-9.
121. Manunta A, Zedde P, Pisanu F, Marras F. Sports-related changes of the synovial membrane. *Joints*. 1 oct 2014;2:181-7.
122. Saxby DJ, Modenese L, Bryant AL, Gerus P, Killen B, Fortin K, et al. Tibiofemoral contact forces during walking, running and sidestepping. *Gait Posture*. 2016;49:78-85.
123. RAMBAUD A, Rossi J, Fourchet F, Samozino P, Edouard P. Single and Triple Hop Tests may support return to run decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. 2017.
124. Barber-Westin S, Noyes MD, Frank, Mangine R, McCloskey, Hartman. Quantitative Assessment of Functional Limitations in Normal and Anterior Cruciate Ligament-Deficient Knees. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1 juin 1990;255:204-14.
125. 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*. nov 2018;52(22):1437-44.

126. Logerstedt DS, Snyder-Mackler L, Ritter RC, Axe MJ, Godges JJ, Orthopaedic Section of the American Physical Therapist Association. Knee stability and movement coordination impairments: knee ligament sprain. *J Orthop Sports Phys Ther.* avr 2010;40(4):A1-37.
127. Myer GD, Sugimoto D, Thomas S, Hewett TE. The influence of age on the effectiveness of neuromuscular training to reduce anterior cruciate ligament injury in female athletes: a meta-analysis. *Am J Sports Med.* janv 2013;41(1):203-15.
128. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med.* juill 2016;50(13):804-8.
129. Noyes FR, Barber SD, Mangine RE. Abnormal lower limb symmetry determined by function hop tests after anterior cruciate ligament rupture. *Am J Sports Med.* oct 1991;19(5):513-8.
130. Thomeé R, Kaplan Y, Kvist J, Myklebust G, Risberg MA, Theisen D, et al. Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 20 sept 2011;19(11):1798.
131. Xergia SA, Pappas E, Georgoulis AD. Association of the Single-Limb Hop Test With Isokinetic, Kinematic, and Kinetic Asymmetries in Patients After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Sports Health.* mai 2015;7(3):217-23.
132. Fitzgerald GK, Lephart SM, Hwang JH, Wainner MRS. Hop Tests as Predictors of Dynamic Knee Stability. *J Orthop Sports Phys Ther.* oct 2001;31(10):588-97.
133. MYER GD, SCHMITT LC, BRENT JL, FORD KR, BARBER FOSS KD, SCHERER BJ, et al. Utilization of Modified NFL Combine Testing to Identify Functional Deficits in Athletes Following ACL Reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* juin 2011;41(6):377-87.
134. 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.* 1 juill 1998;28(1):23-31.
135. Shaw T, Chipchase LS, Williams MT. A users guide to outcome measurement following ACL reconstruction. *Physical Therapy in Sport.* 1 mai 2004;5(2):57-67.
136. Logerstedt D, Grindem H, Lynch A, Eitzen I, Engebretsen L, Risberg MA, et al. 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.* oct 2012;40(10):2348-56.
137. Reid A, Birmingham TB, Stratford PW, Alcock GK, Giffin JR. Hop testing provides a reliable and valid outcome measure during rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther.* mars 2007;87(3):337-49.
138. Barber SD, Noyes FR, Mangine R, DeMaio M. REHABILITATION AFTER ACL RECONSTRUCTION: FUNCTION TESTING. *ORTHOPEDICS.* 1 août 1992;15(8):969-74.
139. Hsu C-J, George SZ, Chmielewski TL. Association of Quadriceps Strength and Psychosocial Factors With Single-Leg Hop Performance in Patients With Meniscectomy. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine.* 1 déc 2016;4(12):2325967116676078.
140. Hopper DM, Goh SC, Wentworth LA, Chan DYK, Chau JHW, Wootton GJ, et al. Test–retest reliability of knee rating scales and functional hop tests one year following anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport.* 1 févr 2002;3(1):10-8.
141. Munro AG, Herrington LC. Between-session reliability of four hop tests and the agility T-test. *J Strength Cond Res.* mai 2011;25(5):1470-7.
142. Wilk KE, Arrigo C, Andrews JR, Clancy WG. Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in the Female Athlete. *J Athl Train.* 1999;34(2):177-93.

143. Fernandes TL, Protta TR, Fregni F, Neto RB, Pedrinelli A, Camanho GL, et al. Isokinetic muscle strength and knee function associated with double femoral pin fixation and fixation with interference screw in anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1 févr 2012;20(2):275-80.
144. Ebert JR, Edwards P, Yi L, Joss B, Ackland T, Carey-Smith R, et al. Strength and functional symmetry is associated with post-operative rehabilitation in patients following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* août 2018;26(8):2353-61.
145. Kockum B, Heijne AI-LM. Hop performance and leg muscle power in athletes: Reliability of a test battery. *Phys Ther Sport.* août 2015;16(3):222-7.
146. Neeter C, Gustavsson A, Thomeé P, Augustsson J, Thomeé R, Karlsson J. Development of a strength test battery for evaluating leg muscle power after anterior cruciate ligament injury and reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* juin 2006;14(6):571-80.
147. Tourville TW, Jarrell KM, Naud S, Slauterbeck JR, Johnson RJ, Beynnon BD. Relationship between isokinetic strength and tibiofemoral joint space width changes after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* févr 2014;42(2):302-11.
148. Decker L, Moraiti C, Stergiou N, Georgoulis A. New insights into anterior cruciate ligament deficiency and reconstruction through the assessment of knee kinematic variability in terms of nonlinear dynamics. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA.* 1 mars 2011;19:1620-33.
149. Krishnan C, Williams GN. Factors Explaining Chronic Knee Extensor Strength Deficits after ACL Reconstruction. *J Orthop Res.* mai 2011;29(5):633-40.
150. Longo UG, Rizzello G, Frnaceschi F, Campi S, Maffulli N, Denaro V. The architecture of the ipsilateral quadriceps two years after successful anterior cruciate ligament reconstruction with bone-patellar tendon-bone autograft. *Knee.* juin 2014;21(3):721-5.
151. Logerstedt D, Lynch A, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Symmetry Restoration and Functional Recovery before and after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* avr 2013;21(4):859-68.
152. Schmitt LC, Paterno MV, Hewett TE. The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* sept 2012;42(9):750-9.
153. Ithurburn MP, Paljieg A, Thomas S, Hewett TE, Paterno MV, Schmitt LC. Strength and Function Across Maturational Levels in Young Athletes at the Time of Return to Sport After ACL Reconstruction. *Sports Health.* juill 2019;11(4):324-31.
154. Undheim MB, Cosgrave C, King E, Strike S, Marshall B, Falvey É, 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.* 1 oct 2015;49(20):1305-10.
155. Drouin JM, Valovich-mcLeod TC, Shultz SJ, Gansneder BM, Perrin DH. Reliability and validity of the Biodex system 3 pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements. *Eur J Appl Physiol.* janv 2004;91(1):22-9.
156. McCleary RW, Andersen JC. Test-retest reliability of reciprocal isokinetic knee extension and flexion peak torque measurements. *J Athl Train.* 1992;27(4):362-5.
157. Li RC, Wu Y, Maffulli N, Chan KM, Chan JL. Eccentric and concentric isokinetic knee flexion and extension: a reliability study using the Cybex 6000 dynamometer. *Br J Sports Med.* juin 1996;30(2):156-60.
158. Holm I, Hammer S, Larsen S, Nordsletten L, Steen H. Can a regular leg extension bench be used in testing deficits of the quadriceps muscle during rehabilitation? *Scand J Med Sci Sports.* févr 1995;5(1):29-35.
159. Feiring DC, Ellenbecker TS, Derscheid GL. Test-retest reliability of the biodex isokinetic dynamometer. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1990;11(7):298-300.
160. Hewett TE, Myer GD, Zazulak BT. Hamstrings to quadriceps peak torque ratios diverge between sexes with increasing isokinetic angular velocity. *J Sci Med Sport.* sept 2008;11(5):452-9.

161. Pua Y-H, Ho J-Y, Chan SA-S, Khoo S-J, Chong H-C. Associations of isokinetic and isotonic knee strength with knee function and activity level after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective cohort study. *The Knee*. 1 oct 2017;24(5):1067-74.
162. Muff G, Dufour S, Meyer A, Severac F, Favret F, Geny B, et al. Comparative assessment of knee extensor and flexor muscle strength measured using a hand-held vs. isokinetic dynamometer. *J Phys Ther Sci*. sept 2016;28(9):2445-51.
163. Kim WK, Kim D-K, Seo KM, Kang SH. Reliability and validity of isometric knee extensor strength test with hand-held dynamometer depending on its fixation: a pilot study. *Ann Rehabil Med*. févr 2014;38(1):84-93.
164. Stark T, Walker B, Phillips JK, Fejer R, Beck R. Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry: a systematic review. *PM R*. mai 2011;3(5):472-9.
165. Almeida GPL, Albano TR, Melo AKP. Hand-held dynamometer identifies asymmetries in torque of the quadriceps muscle after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. août 2019;27(8):2494-501.
166. Whiteley R, Jacobsen P, Prior S, Skazalski C, Otten R, Johnson A. Correlation of isokinetic and novel hand-held dynamometry measures of knee flexion and extension strength testing. *J Sci Med Sport*. sept 2012;15(5):444-50.
167. Katoh M, Hiiragi Y, Uchida M. Validity of Isometric Muscle Strength Measurements of the Lower Limbs Using a Hand-held Dynamometer and Belt: a Comparison with an Isokinetic Dynamometer. *Journal of Physical Therapy Science*. 1 janv 2011;23:553-7.
168. Bohannon RW. Hand-held dynamometry: A practicable alternative for obtaining objective measures of muscle strength. *Isokinetics and Exercise Science*. 1 janv 2012;20(4):301-15.
169. Paul DJ, Nassis GP. Testing Strength and Power in Soccer Players: The Application of Conventional and Traditional Methods of Assessment. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. juin 2015;29(6):1748–1758.
170. Bohannon RW. Hand-Held Dynamometry: Adoption 1900–2005: Perceptual and Motor Skills [Internet]. 4 déc 2016 [cité 24 mars 2020]; Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/10.2466/pms.103.1.3-4?icid=int.sj-abstract.similar-articles.1>
171. Hansen EM, McCartney CN, Sweeney RS, Palimenio MR, Grindstaff TL. Hand-held Dynamometer Positioning Impacts Discomfort During Quadriceps Strength Testing: A Validity and Reliability Study. *Int J Sports Phys Ther*. févr 2015;10(1):62-8.
172. Mentiplay BF, Perraton LG, Bower KJ, Adair B, Pua Y-H, Williams GP, et al. Assessment of Lower Limb Muscle Strength and Power Using Hand-Held and Fixed Dynamometry: A Reliability and Validity Study. *PLoS ONE*. 2015;10(10):e0140822.
173. Kolber M, Cleland J. Strength testing using hand-held dynamometry. *Physical Therapy Reviews*. 1 juin 2005;10:99-112.
174. Arnold CM, Warkentin KD, Chilibeck PD, Magnus CRA. The reliability and validity of handheld dynamometry for the measurement of lower-extremity muscle strength in older adults. *J Strength Cond Res*. mars 2010;24(3):815-24.
175. Martins J, da Silva JR, da Silva MRB, Bevilaqua-Grossi D. Reliability and Validity of the Belt-Stabilized Handheld Dynamometer in Hip- and Knee-Strength Tests. *J Athl Train*. sept 2017;52(9):809-19.
176. Lesnak J, Anderson D, Farmer B, Katsavelis D, Grindstaff TL. VALIDITY OF HAND-HELD DYNAMOMETRY IN MEASURING QUADRICEPS STRENGTH AND RATE OF TORQUE DEVELOPMENT. *Int J Sports Phys Ther*. avr 2019;14(2):180-7.
177. Decarlo MS, Shelbourne KD, McCarroll JR, Rettig AC. Traditional versus Accelerated Rehabilitation following ACL Reconstruction: A One-Year Follow-Up. *J Orthop Sports Phys Ther*. 1992;15(6):309-16.

178. Karasel S, Akpınar B, Gülbahar S, Baydar M, El O, Pınar H, 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(3):220-8.
179. Lemiesz G, Lemiesz E, Wołosewicz M, Aptowicz J, Kuczkowski C. The effectiveness of rehabilitation procedure after the reconstruction of the anterior cruciate ligament according to the norwegian protocol. *Polish Annals of Medicine.* 1 janv 2011;18(1):82-95.
180. Shelbourne KD, Klootwyk TE, Decarlo MS. Update on accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1992;15(6):303-8.
181. Yabroudi MA, Irrgang JJ. Rehabilitation and return to play after anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Sports Med.* janv 2013;32(1):165-75.
182. 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(3):37-44.
183. Joreitz R, Lynch A, Rabuck S, Lynch B, Davin S, Irrgang J. PATIENT-SPECIFIC AND SURGERY-SPECIFIC FACTORS THAT AFFECT RETURN TO SPORT AFTER ACL RECONSTRUCTION. *Int J Sports Phys Ther.* avr 2016;11(2):264-78.
184. Manal TJ, Snyder-Mackler L. Practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation: a criterion-based rehabilitation progression. *Operative Techniques in Orthopaedics.* 1 juill 1996;6(3):190-6.
185. 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.* mars 2010;40(3):141-54.
186. Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *Am J Sports Med.* juin 1982;10(3):150-4.
187. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res.* sept 1985;(198):43-9.
188. Chaory K, Poiraudou S. Les grilles d'évaluations dans la ligamentoplastie du LCA. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique.* 1 août 2004;47(6):309-16.
189. Chao W-C, Shih J-C, Chen K-C, Wu C-L, Wu N-Y, Lo C-S. The Effect of Functional Movement Training After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial. *J Sport Rehabil.* 1 nov 2018;27(6):541-5.
190. Briggs KK, Lysholm J, Tegner Y, Rodkey WG, Kocher MS, Steadman JR. The reliability, validity, and responsiveness of the Lysholm score and Tegner activity scale for anterior cruciate ligament injuries of the knee: 25 years later. *Am J Sports Med.* mai 2009;37(5):890-7.
191. Examen clinique de l'appareil locomoteur | Elsevier Masson [Internet]. [cité 30 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.elsevier-masson.fr/examen-clinique-de-lappareil-locomoteur-9782294754470.html>
192. Sato Y. The history and future of KAATSU Training. *Int J KAATSU Training Res.* 2005;1(1):1-5.
193. Trofa DP, Obana KK, Herndon CL, Noticewala MS, Parisien RL, Popkin CA, et al. The Evidence for Common Nonsurgical Modalities in Sports Medicine, Part 2: Cupping and Blood Flow Restriction. *JAAOS: Global Research and Reviews.* janv 2020;4(1):e1900105.
194. Scott BR, Loenneke JP, Slattery KM, Dascombe BJ. Exercise with blood flow restriction: an updated evidence-based approach for enhanced muscular development. *Sports Med.* mars 2015;45(3):313-25.
195. Fujita S, Abe T, Drummond MJ, Cadenas JG, Dreyer HC, Sato Y, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *J Appl Physiol.* sept 2007;103(3):903-10.
196. Kawada S, Ishii N. Changes in skeletal muscle size, fibre-type composition and capillary supply after chronic venous occlusion in rats. *Acta Physiol (Oxf).* avr 2008;192(4):541-9.

197. Dankel SJ, Jessee MB, Abe T, Loenneke JP. The Effects of Blood Flow Restriction on Upper-Body Musculature Located Distal and Proximal to Applied Pressure. *Sports Med.* janv 2016;46(1):23-33.
198. Patterson SD, Hughes L, Warmington S, Burr J, Scott BR, Owens J, et al. Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety. *Front Physiol* [Internet]. 2019 [cité 21 mars 2020];10. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00533/full>
199. Manini T, Clark B. Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. *Exercise and sport sciences reviews.* 1 mai 2009;37:78-85.
200. Spranger MD, Krishnan AC, Levy PD, O'Leary DS, Smith SA. Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* nov 2015;309(9):H1440-1452.
201. Gao S, Durstine JL, Koh H-J, Carver WE, Frizzell N, Carson JA. Acute myotube protein synthesis regulation by IL-6-related cytokines. *Am J Physiol, Cell Physiol.* 1 nov 2017;313(5):C487-500.
202. Rossi FE, de Freitas MC, Zanchi NE, Lira FS, Cholewa JM. The Role of Inflammation and Immune Cells in Blood Flow Restriction Training Adaptation: A Review. *Front Physiol.* 2018;9:1376.
203. Moritani T, Sherman WM, Shibata M, Matsumoto T, Shinohara M. Oxygen availability and motor unit activity in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1992;64(6):552-6.
204. Laurentino GC, Ugrinowitsch C, Roschel H, Aoki MS, Soares AG, Neves M, et al. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression. *Med Sci Sports Exerc.* mars 2012;44(3):406-12.
205. Nielsen JL, Frandsen U, Prokhorova T, Bech RD, Nygaard T, Suetta C, et al. Delayed Effect of Blood Flow-restricted Resistance Training on Rapid Force Capacity. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49(6):1157-67.
206. Wernbom M, Apro W, Paulsen G, Nilsen TS, Blomstrand E, Raastad T. Acute low-load resistance exercise with and without blood flow restriction increased protein signalling and number of satellite cells in human skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol.* déc 2013;113(12):2953-65.
207. Inagaki Y, Madarame H, Neya M, Ishii N. Increase in serum growth hormone induced by electrical stimulation of muscle combined with blood flow restriction. *Eur J Appl Physiol.* nov 2011;111(11):2715-21.
208. Lipker LA, Persinger CR, Michalko BS, Durall CJ. Blood Flow Restriction Therapy Versus Standard Care for Reducing Quadriceps Atrophy After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Sport Rehabil.* 3 mars 2019;1-5.
209. Hughes L, Paton B, Rosenblatt B, Gissane C, Patterson SD. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* juill 2017;51(13):1003-11.
210. Loenneke JP, Wilson JM, Marín PJ, Zourdos MC, Bemben MG. Low intensity blood flow restriction training: a meta-analysis. *Eur J Appl Physiol.* 1 mai 2012;112(5):1849-59.
211. Takarada Y, Sato Y, Ishii N. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *Eur J Appl Physiol.* févr 2002;86(4):308-14.
212. Ferraz RB, Gualano B, Rodrigues R, Kurimori CO, Fuller R, Lima FR, et al. Benefits of Resistance Training with Blood Flow Restriction in Knee Osteoarthritis. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50(5):897-905.
213. Ladlow P, Coppack RJ, Dharm-Datta S, Conway D, Sellon E, Patterson SD, et al. Low-Load Resistance Training With Blood Flow Restriction Improves Clinical Outcomes in Musculoskeletal Rehabilitation: A Single-Blind Randomized Controlled Trial. *Front Physiol.* 2018;9:1269.
214. Giles L, Webster KE, McClelland J, Cook JL. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: a double-blind randomised trial. *Br J Sports Med.* 1 déc 2017;51(23):1688-94.
215. Bryk FF, dos Reis AC, Fingerhut D, Araujo T, Schutzer M, Cury R de PL, et al. Exercises with partial vascular occlusion in patients with knee osteoarthritis: a randomized clinical trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1 mai 2016;24(5):1580-6.

216. Yasuda T, Abe T, Sato Y, Midorikawa T, Kearns CF, Inoue K, et al. Muscle fiber cross-sectional area is increased after two weeks of twice daily KAATSU-resistance training. *Int J KAATSU Training Res.* 2005;1(2):65-70.
217. Žargi T, Drobnič M, Stražar K, Kacin A. Short-Term Preconditioning With Blood Flow Restricted Exercise Preserves Quadriceps Muscle Endurance in Patients After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Front Physiol.* 2018;9:1150.
218. Sousa J, Neto GR, Santos HH, Araújo JP, Silva HG, Cirilo-Sousa MS. Effects of strength training with blood flow restriction on torque, muscle activation and local muscular endurance in healthy subjects. *Biol Sport.* mars 2017;34(1):83-90.
219. Kacin A, Strazar K. Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scandinavian journal of medicine & science in sports.* 1 mars 2011;21:e231-41.
220. Cook SB, Brown KA, Deruisseau K, Kanaley JA, Ploutz-Snyder LL. Skeletal muscle adaptations following blood flow-restricted training during 30 days of muscular unloading. *J Appl Physiol.* août 2010;109(2):341-9.
221. Kubota A, Sakuraba K, Sawaki K, Sumide T, Tamura Y. Prevention of disuse muscular weakness by restriction of blood flow. *Med Sci Sports Exerc.* mars 2008;40(3):529-34.
222. Kubota A, Sakuraba K, Koh S, Ogura Y, Tamura Y. Blood flow restriction by low compressive force prevents disuse muscular weakness. *J Sci Med Sport.* mars 2011;14(2):95-9.
223. Held S, Behringer M, Donath L. Low intensity rowing with blood flow restriction over 5 weeks increases $\dot{V}O_2\text{max}$ in elite rowers: A randomized controlled trial. *J Sci Med Sport.* 15 oct 2019;
224. Oliveira MFM de, Caputo F, Corvino RB, Denadai BS. Short-term low-intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports.* 2016;26(9):1017-25.
225. Letieri RV, Teixeira AM, Furtado GE, Lamboglia CG, Rees JL, Gomes BB. Effect of 16 weeks of resistance exercise and detraining comparing two methods of blood flow restriction in muscle strength of healthy older women: A randomized controlled trial. *Experimental Gerontology.* 1 déc 2018;114:78-86.
226. Abe T, Fujita S, Nakajima T, Sakamaki M, Ozaki H, Ogasawara R, et al. Effects of Low-Intensity Cycle Training with Restricted Leg Blood Flow on Thigh Muscle Volume and $VO_2\text{MAX}$ in Young Men. *J Sports Sci Med.* 1 sept 2010;9(3):452-8.
227. Ferreira MLV, Sardeli AV, Souza GVD, Bonganha V, Santos LDC, Castro A, et al. Cardiac autonomic and haemodynamic recovery after a single session of aerobic exercise with and without blood flow restriction in older adults. *J Sports Sci.* déc 2017;35(24):2412-20.
228. Evans C, Vance S, Brown M. Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles. *J Sports Sci.* juill 2010;28(9):999-1007.
229. Takano H, Morita T, Iida H, Kato M, Uno K, Hirose K, et al. Effects of low-intensity “KAATSU” resistance exercise on hemodynamic and growth hormone responses. *International Journal of Kaatsu Training Research.* 1 janv 2005;1:13-8.
230. Miranda M, Reusser A, Sherer B, Reinhart C, Murray L. Is low load blood flow restriction training an effective intervention in improving clinical outcomes in adults with lower extremity pathology: a systematic review. *Physical Therapy Reviews.* 3 sept 2019;24(5):185-94.
231. Korakakis V, Whiteley R, Giakas G. Low load resistance training with blood flow restriction decreases anterior knee pain more than resistance training alone. A pilot randomised controlled trial. *Phys Ther Sport.* nov 2018;34:121-8.
232. Korakakis V, Whiteley R, Epameinontidis K. Blood Flow Restriction induces hypoalgesia in recreationally active adult male anterior knee pain patients allowing therapeutic exercise loading. *Phys Ther Sport.* juill 2018;32:235-43.

233. Hughes L, Patterson SD, Haddad F, Rosenblatt B, Gissane C, McCarthy D, et al. Examination of the comfort and pain experienced with blood flow restriction training during post-surgery rehabilitation of anterior cruciate ligament reconstruction patients: A UK National Health Service trial. *Phys Ther Sport*. sept 2019;39:90-8.
234. Behringer M, Behlau D, Montag JCK, McCourt ML, Mester J. Low-Intensity Sprint Training With Blood Flow Restriction Improves 100-m Dash. *J Strength Cond Res*. sept 2017;31(9):2462-72.
235. Nakajima T, Kurano M, Iida H, Takano H, Oonuma H, Morita T, et al. Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey. *International Journal of Kaatsu Training Research*. 1 janv 2006;2:5-13.
236. Loenneke JP, Thiebaud RS, Abe T. Does blood flow restriction result in skeletal muscle damage? A critical review of available evidence. *Scand J Med Sci Sports*. déc 2014;24(6):e415-422.
237. Thiebaud RS, Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, Kim D, Abe T, et al. The effects of elastic band resistance training combined with blood flow restriction on strength, total bone-free lean body mass and muscle thickness in postmenopausal women. *Clin Physiol Funct Imaging*. sept 2013;33(5):344-52.
238. Wernbom M, Paulsen G, Nilsen TS, Hisdal J, Raastad T. Contractile function and sarcolemmal permeability after acute low-load resistance exercise with blood flow restriction. *Eur J Appl Physiol*. juin 2012;112(6):2051-63.
239. Thompson KMA, Slysz JT, Burr JF. Risks of Exertional Rhabdomyolysis With Blood Flow-Restricted Training: Beyond the Case Report. *Clin J Sport Med*. 2018;28(6):491-2.
240. Abe T, Yasuda T, Midorikawa T, Sato Y, Kearns CF, Inoue K, et al. Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily “KAATSU” resistance training. *International Journal of KAATSU Training Research*. 2005;1(1):6-12.
241. Krieger J, Sims D, Wolterstorff C. A Case of Rhabdomyolysis Caused by Blood Flow-Restricted Resistance Training. *J Spec Oper Med*. Summer 2018;18(2):16-7.
242. Tabata S, Suzuki Y, Azuma K, Matsumoto H. Rhabdomyolysis After Performing Blood Flow Restriction Training: A Case Report. *J Strength Cond Res*. juill 2016;30(7):2064-8.
243. Clark BC, Manini TM. Can KAATSU Exercise Cause Rhabdomyolysis? *Clin J Sport Med*. janv 2017;27(1):e1-2.
244. Sorichter S, Puschendorf B, Mair J. Skeletal muscle injury induced by eccentric muscle action: muscle proteins as markers of muscle fiber injury. *Exerc Immunol Rev*. 1999;5:5-21.
245. Kucher N. Clinical practice. Deep-vein thrombosis of the upper extremities. *N Engl J Med*. 3 mars 2011;364(9):861-9.
246. Harman JW. The Significance of Local Vascular Phenomena in the Production of Ischemic Necrosis in Skeletal Muscle. *Am J Pathol*. mai 1948;24(3):625-41.
247. Bond CW, Hackney KJ, Brown SL, Noonan BC. Blood Flow Restriction Resistance Exercise as a Rehabilitation Modality Following Orthopaedic Surgery: A Review of Venous Thromboembolism Risk. *J Orthop Sports Phys Ther*. janv 2019;49(1):17-27.
248. Domingos E, Polito MD. Blood pressure response between resistance exercise with and without blood flow restriction: A systematic review and meta-analysis. *Life Sci*. 15 sept 2018;209:122-31.
249. Hughes L, Paton B, Haddad F, Rosenblatt B, Gissane C, Patterson SD. Comparison of the acute perceptual and blood pressure response to heavy load and light load blood flow restriction resistance exercise in anterior cruciate ligament reconstruction patients and non-injured populations. *Phys Ther Sport*. sept 2018;33:54-61.
250. Hollander DB, Reeves GV, Clavier JD, Francois MR, Thomas C, Kraemer RR. Partial Occlusion During Resistance Exercise Alters Effort Sense and Pain. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. janv 2010;24(1):235–243.

251. Neto GR, Novaes JS, Salerno VP, Gonçalves MM, Piazeria BKL, Rodrigues-Rodrigues T, et al. Acute Effects of Resistance Exercise With Continuous and Intermittent Blood Flow Restriction on Hemodynamic Measurements and Perceived Exertion. *Percept Mot Skills*. févr 2017;124(1):277-92.
252. Fitschen PJ, Kistler BM, Jeong JH, Chung HR, Wu PT, Walsh MJ, et al. Perceptual effects and efficacy of intermittent or continuous blood flow restriction resistance training. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2014;34(5):356-63.
253. Hughes L, Rosenblatt B, Paton B, Patterson S. Blood Flow Restriction Training in Rehabilitation Following Anterior Cruciate Ligament Reconstructive Surgery: A Review. *Techniques in Orthopaedics*. juin 2018;33(2):106-13.
254. Kilgas MA, Lytle LLM, Drum SN, Elmer SJ. Exercise with Blood Flow Restriction to Improve Quadriceps Function Long After ACL Reconstruction. *Int J Sports Med*. sept 2019;40(10):650-6.
255. Minniti MC, Statkevich AP, Kelly RL, Rigsby VP, Exline MM, Rhon DI, et al. The Safety of Blood Flow Restriction Training as a Therapeutic Intervention for Patients With Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review. *Am J Sports Med*. 11 nov 2019;363546519882652.
256. Segal N, Davis MD, Mikesky AE. Efficacy of Blood Flow-Restricted Low-Load Resistance Training For Quadriceps Strengthening in Men at Risk of Symptomatic Knee Osteoarthritis. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*. sept 2015;6(3):160-7.
257. Segal NA, Williams GN, Davis MC, Wallace RB, Mikesky AE. Efficacy of blood flow-restricted, low-load resistance training in women with risk factors for symptomatic knee osteoarthritis. *PM R*. avr 2015;7(4):376-84.
258. Nakajima T, Morita T, Sato Y. Key considerations when conducting KAATSU training. *Int J KAATSU Training Res*. 2011;7(1):1-6.
259. Loenneke JP, Wilson JM, Wilson GJ, Pujol TJ, Bemben MG. Potential safety issues with blood flow restriction training. *Scand J Med Sci Sports*. août 2011;21(4):510-8.
260. McEwen JA, Owens JG, Jeyasurya J. Why is it Crucial to Use Personalized Occlusion Pressures in Blood Flow Restriction (BFR) Rehabilitation? *J Med Biol Eng*. 1 avr 2019;39(2):173-7.
261. Sieljacks P, Knudsen L, Wernbom M, Vissing K. Body position influences arterial occlusion pressure: implications for the standardization of pressure during blood flow restricted exercise. *Eur J Appl Physiol*. févr 2018;118(2):303-12.
262. Hughes L, Jeffries O, Waldron M, Rosenblatt B, Gissane C, Paton B, et al. Influence and reliability of lower-limb arterial occlusion pressure at different body positions. *PeerJ*. 2018;6:e4697.
263. Weatherholt AM, Vanwyke WR, Lohmann J, Owens JG. The Effect of Cuff Width for Determining Limb Occlusion Pressure: A Comparison of Blood Flow Restriction Devices. *Int J Exerc Sci*. 2019;12(3):136-43.
264. Bezerra de Moraes AT, Santos Cerqueira M, Moreira Sales R, Rocha T, Galvão de Moura Filho A. Upper limbs total occlusion pressure assessment: Doppler ultrasound reproducibility and determination of predictive variables. *Clin Physiol Funct Imaging*. juill 2017;37(4):437-41.
265. Loenneke J, Pujol T. The Use of Occlusion Training to Produce Muscle Hypertrophy. *Strength & Conditioning Journal*. 1 juin 2009;31:77-84.
266. Laurentino GC, Loenneke JP, Mouser JG, Buckner SL, Counts BR, Dankel SJ, et al. Validity of the Handheld Doppler to Determine Lower-Limb Blood Flow Restriction Pressure for Exercise Protocols. *J Strength Cond Res*. 14 juin 2018;
267. Loenneke J, Abe T, Wilson J, Thiebaud R, Fahs C, Rossow L, et al. Blood flow restriction: An evidence based progressive model (Review). *Acta Physiologica Hungarica*. sept 2012;99(3):235-50.
268. Ohta H, Kurosawa H, Ikeda H, Iwase Y, Satou N, Nakamura S. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthop Scand*. févr 2003;74(1):62-8.

269. Iversen E, Røstad V, Larmo A. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Sport Health Sci.* mars 2016;5(1):115-8.
270. Lu Y, Patel BH, Kym C, Nwachukwu BU, Beletksy A, Forsythe B, et al. Perioperative Blood Flow Restriction Rehabilitation in Patients Undergoing ACL Reconstruction: A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine.* 1 mars 2020;8(3):2325967120906822.
271. Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, Thiebaud RS, Mattocks KT, Abe T, et al. Blood flow restriction pressure recommendations: a tale of two cuffs. *Front Physiol* [Internet]. 10 sept 2013 [cité 21 mars 2020];4. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3767914/>
272. Hunt JEA, Stodart C, Ferguson RA. The influence of participant characteristics on the relationship between cuff pressure and level of blood flow restriction. *Eur J Appl Physiol.* juill 2016;116(7):1421-32.
273. Loenneke JP, Allen KM, Mouser JG, Thiebaud RS, Kim D, Abe T, et al. Blood flow restriction in the upper and lower limbs is predicted by limb circumference and systolic blood pressure. *Eur J Appl Physiol.* févr 2015;115(2):397-405.
274. Loenneke JP, Thiebaud RS, Fahs CA, Rossow LM, Abe T, Bemben MG. Effect of cuff type on arterial occlusion. *Clin Physiol Funct Imaging.* juill 2013;33(4):325-7.
275. Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, Sherk VD, Thiebaud RS, Abe T, et al. Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise. *Eur J Appl Physiol.* août 2012;112(8):2903-12.
276. Crenshaw AG, Hargens AR, Gershuni DH, Rydevik B. Wide tourniquet cuffs more effective at lower inflation pressures. *Acta Orthop Scand.* août 1988;59(4):447-51.
277. Rossow LM, Fahs CA, Loenneke JP, Thiebaud RS, Sherk VD, Abe T, et al. Cardiovascular and perceptual responses to blood-flow-restricted resistance exercise with differing restrictive cuffs. *Clin Physiol Funct Imaging.* sept 2012;32(5):331-7.
278. Noordin S, McEwen JA, Kragh JF, Eisen A, Masri BA. Surgical tourniquets in orthopaedics. *J Bone Joint Surg Am.* déc 2009;91(12):2958-67.
279. Fahs CA, Loenneke JP, Rossow LM, Thiebaud RS, Bemben MG. Methodological considerations for blood flow restricted resistance exercise. *Journal of Trainology.* 2012;1(1):14-22.
280. Koltyn KF, Brellenthin AG, Cook DB, Sehgal N, Hillard C. Mechanisms of exercise-induced hypoalgesia. *J Pain.* déc 2014;15(12):1294-304.
281. Koltyn KF. Analgesia Following Exercise. *Sports Med.* 1 févr 2000;29(2):85-98.
282. Hartwich D, Dear WE, Waterfall JL, Fisher JP. Delayed-onset muscle soreness induced by low-load blood flow-restricted exercise. *J Physiol (Lond).* 15 déc 2011;589(Pt 24):6157-71.
283. Suga T, Okita K, Morita N, Yokota T, Hirabayashi K, Horiuchi M, et al. Dose effect on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *J Appl Physiol.* juin 2010;108(6):1563-7.
284. Jessee M, Dankel S, Buckner S, Mouser J, Mattocks K, Loenneke J. The Cardiovascular and Perceptual Response to Very Low Load Blood Flow Restricted Exercise. *International Journal of Sports Medicine.* 26 juin 2017;38.
285. Martín-Hernández J, Ruiz-Aguado J, Herrero AJ, Loenneke JP, Aagaard P, Cristi-Montero C, et al. Adaptation of Perceptual Responses to Low-Load Blood Flow Restriction Training. *J Strength Cond Res.* mars 2017;31(3):765-72.
286. Loenneke J, Balapur A, Thrower A, Barnes J, Pujol T. The Perceptual Responses to Occluded Exercise. *International journal of sports medicine.* 1 déc 2010;32:181-4.
287. Neto GR, Santos HH, Sousa JBC, Júnior ATA, Araújo JP, Aniceto RR, et al. Effects of High-Intensity Blood Flow Restriction Exercise on Muscle Fatigue. *Journal of Human Kinetics.* 8 juill 2014;41(1):163-72.

288. Mattocks KT, Jessee MB, Counts BR, Buckner SL, Grant Mouser J, Dankel SJ, et al. The effects of upper body exercise across different levels of blood flow restriction on arterial occlusion pressure and perceptual responses. *Physiology & Behavior*. 15 mars 2017;171:181-6.
289. Clarkson MJ, Fraser SF, Bennett PN, McMahon LP, Brumby C, Warmington SA. Efficacy of blood flow restriction exercise during dialysis for end stage kidney disease patients: protocol of a randomised controlled trial. *BMC Nephrol*. 11 sept 2017;18(1):294.
290. Weatherholt A, Beekley M, Greer S, Urtel M, Mikesky A. Modified Kaatsu training: adaptations and subject perceptions. *Med Sci Sports Exerc*. mai 2013;45(5):952-61.
291. Brandner C, May A, Clarkson M, Warmington S. Reported Side-effects and Safety Considerations for the Use of Blood Flow Restriction During Exercise in Practice and Research. *Techniques in Orthopaedics*. 1 avr 2018;33:1.
292. Akima H, Furukawa T. Atrophy of thigh muscles after meniscal lesions and arthroscopic partial meniscectomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 1 nov 2005;13(8):632-7.
293. Žargi TG, Drobnič M, Jkoder J, Stražar K, Kacin A. The effects of preconditioning with ischemic exercise on quadriceps femoris muscle atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction: a quasi-randomized controlled trial. *European journal of physical and rehabilitation medicine*. 2016;
294. Chmielewski TL, Jones D, Day T, Tillman SM, Lentz TA, George SZ. The association of pain and fear of movement/reinjury with function during anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation. *J Orthop Sports Phys Ther*. déc 2008;38(12):746-53.
295. Aminaka N, Pietrosimone BG, Armstrong CW, Meszaros A, Gribble PA. Patellofemoral pain syndrome alters neuromuscular control and kinetics during stair ambulation. *J Electromyogr Kinesiol*. août 2011;21(4):645-51.
296. Henriksen M, Rosager S, Aaboe J, Graven-Nielsen T, Bliddal H. Experimental knee pain reduces muscle strength. *J Pain*. avr 2011;12(4):460-7.
297. Osterås H, Augestad LB, Tøndel S. Isokinetic muscle strength after anterior cruciate ligament reconstruction. *Scand J Med Sci Sports*. oct 1998;8(5 Pt 1):279-82.
298. Gerometta A, Khiami F, Lutz C, Lefevre N, Herman S, Thoreux P, et al. Reprise du sport après ligamentoplastie du ligament croisé antérieur chez 239 sportifs. [/data/revues/18770517/v101i8sS/S1877051715005961/](https://www.em-consulte.com/en/article/1017892) [Internet]. 26 nov 2015 [cité 28 avr 2020]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/1017892>
299. Bohu Y, Klouche S, Lefevre N, Webster K, Herman S. 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*. 1 avr 2015;23(4):1192-6.
300. Seo D-I, Kim E, Fahs CA, Rossow L, Young K, Ferguson SL, et al. Reliability of the one-repetition maximum test based on muscle group and gender. *J Sports Sci Med*. 2012;11(2):221-5.
301. Reynolds JM, Gordon TJ, Robergs RA. Prediction of one repetition maximum strength from multiple repetition maximum testing and anthropometry. *J Strength Cond Res*. août 2006;20(3):584-92.
302. Tan AEL, Grisbrook TL, Minaee N, Williams SA. Predicting 1 Repetition Maximum Using Handheld Dynamometry. *PM R*. 2018;10(9):934-41.
303. Loenneke JP, Thiebaud RS, Fahs CA, Rossow LM, Abe T, Bembien MG. Blood flow restriction does not result in prolonged decrements in torque. *Eur J Appl Physiol*. avr 2013;113(4):923-31.
304. Hiemstra LA, Webber S, MacDonald PB, Kriellaars DJ. Contralateral limb strength deficits after anterior cruciate ligament reconstruction using a hamstring tendon graft. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. juin 2007;22(5):543-50.
305. Wellsandt E, Failla MJ, Snyder-Mackler L. Limb Symmetry Indexes Can Overestimate Knee Function After Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Orthop Sports Phys Ther*. mai 2017;47(5):334-8.

8 Annexes

Sommaire des annexes

Annexe I : Tableau récapitulatif des caractéristiques des principales autogreffes (rev med suisse 2017).....	82
Annexe II : Tableau récapitulatif de la prise en charge du LCA jusqu'à la reprise de course à pied.	83
Annexe III : Résumé des recommandations et preuves concernant les modalités de prise en charge du LCA opéré (van Melick et al 2016).....	85
Annexe IV : Description des Hops test (Rambaud et al. 2016).....	86
Annexe V : Grille d'évaluation des risques liés à l'utilisation du BFR (Nakajima et al; traduite en français par KINESPORT).	88
Annexe VI : Echelle PEDro.....	89
Annexe VII : Vue d'ensemble des caractéristiques des études.	90
Annexe VIII : Evaluation de la qualité méthodologique des études (PEDro).	91
Annexe IX : Document d'information et de consentement	92
Annexe X : Protocole de détermination de la 1RM.....	97
Annexe XI : Test de vérification de l'épanchement du genou	98
Annexe XII : Protocole d'évaluation de la force isométrique du Quadriceps et de calcul du <i>Limb Symmetry Index</i> (LSI).....	99
Annexe XIII : Vue d'ensemble des protocoles d'étude.....	101
Annexe XIV : Synthèse des résultats des études	102

Annexe I : Tableau récapitulatif des caractéristiques des principales autogreffes (rev med suisse 2017).

	Avantages	Inconvénients
BPTB	<p>Charge à la résistance supérieure (2977N vs. 2160N pour le LCA natif)</p> <p>Consolidation rapide par guérison osseuse</p> <p>Longueur idéale du tendon</p> <p>Ratio ischio-jambiers/quadriceps respecté en postopératoire</p>	<p>Grefe tendineuse fine et non adaptable</p> <p>Douleurs antérieures de genou fréquentes</p> <p>Perte de sensibilité prépatellaire</p> <p>Vulnérabilité structurelle de l'appareil extenseur</p> <p>Tendinite patellaire</p> <p>Patella infera ou fracture patellaire</p>
DIDT	<p>Charge à la résistance supérieure (4SHT : 4090N)</p> <p>Intégrité de l'appareil extenseur</p> <p>Longueur et épaisseur adaptable</p> <p>Possibilité d'associer la technique à double faisceau (double-bundle)</p> <p>Possibilité d'associer une reconstruction du ligament antéro-latéral (ALL)</p>	<p>Consolidation os-tendon plus lente</p> <p>Elargissement du tunnel par effet élastique (bungee-effect)</p> <p>Perte de sensibilité (nerf saphène)</p> <p>Perte de flexion en actif</p> <p>Effet négatif sur le ratio ischio-jambiers/quadriceps</p> <p>Effet défavorable sur le contrôle dynamique de la rotation interne du tibia</p> <p>Grefe variable (longueur et épaisseur)</p>
TQ	<p>Charge à la résistance supérieure (2174N)</p> <p>Hautement polyvalent (diamètre, longueur, pastille osseuse)</p> <p>Préservation de la force de l'appareil extenseur</p> <p>Ratio ischio-jambiers/quadriceps respecté en postopératoire</p> <p>Faible incidence de douleur antérieure du genou</p> <p>Pas de perte de sensibilité</p> <p>Faible influence sur la mobilité de la patella et sur la cicatrisation de la région infrapatellaire</p>	<p>Variation anatomique</p> <p>(couches tendineuses et graisseuses entre les feuillets, hautement variables)</p> <p>Risque de formation de large tissu cicatriciel</p> <p>Risque d'hématome postopératoire</p> <p>Risque de fracture patellaire lors de greffe avec pastille osseuse</p>

Annexe II : Tableau récapitulatif de la prise en charge du LCA jusqu'à la reprise de course à pied.

	Objectifs	Moyens
<p>Phase 1</p>	<p>- extension de genou de 0° - gonflement minime du genou - contrôle volontaire du quadriceps - schéma de marche actif dynamique</p> <p>Vigilance : - si signes d'infections et/ou non fermeture de cicatrice, renvoyer vers le chirurgien - si déficit important de mobilité de patella, renvoyer vers le chirurgien (risque de sd femoro-patellaire) - si déficit d'extension du genou en charge et/ou perte de l'extension, consulter le chirurgien : surtout si gonflement et douleur associée (risque de cyclops syndrome)</p>	<p>Amplitude :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mobilisation passive de patella ▪ Travail de l'extension de genou en passif et en actif ▪ Travail de la flexion de genou en passif, actif aidé et actif ▪ Massage, drainage <p>Renforcement musculaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Renforcement quadriceps (cf protocole) ▪ En parallèle renforcement progressif en concentrique/excentrique des fessiers, des mollets et des II (avec prudence pour les II, en fct° du site de prélèvement) <p>Reprogrammation neuromusculaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Travail d'appui progressif ▪ Proprioception progressive, d'abord en bipodal, puis transfert d'appui... <p>Marche et vélo :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Remise en charge immédiate de la jambe opérée (avec béquille si besoin) ▪ Travail qualitatif des différentes phases du cycle de marche ▪ Vélo : début dès que flex° genou de 120° <p>NB : Toujours rester indolore. Ajustement des moyens en fonction de la douleur/gonflement du genou (ex : possibilité de douleur pour PEC antalgique)</p>
<p>Critères de passage en phase 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cicatrice fermée ▪ Absence de douleur de genou sur les exercices de la phase 1 ▪ Gonflement minime du genou ▪ Mobilité normale de la patella à gauche et à droite 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une extension de genou d'au moins 0° et une flexion d'au moins 120° ▪ Contrôle volontaire du quadriceps ▪ Exécution qualitative correcte des exercices de la première phase ▪ Acquisition d'un schéma de marche dynamique actif

	Objectifs	Moyens
<p>Phase 2</p>	<p>Effectuer sans restriction des tâches spécifiques au sport et un travail physiquement exigeant (dont celui de la course à pied).</p>	<p><u>Amplitude</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ entretien des mobilités <p><u>Renforcement musculaire</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ quadriceps (cf protocole) ▪ IJ : Si prélèvement IJ, travail en CCO avec résistance pas avant 12 semaines ▪ intensification du travail des fessiers et des mollets <p><u>Reprogrammation neuromusculaire</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intensification, augmentation de la difficulté ▪ début des sauts (dans l'axe pour le moment) <p>NB : veiller à une exécution correcte, fluide de chaque exercice</p> <p><u>Marche et vélo</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intensification du travail sur vélo (travail aérobic, augmentation de résistance et/ou de cadence) <p><u>Travail fonctionnel</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ajout de tâche spécifique à l'activité, dans l'axe, sans risque de tension sur la greffe (ex : travail de passe pour un footballeur) <p><u>Course à pied</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En fonction de l'évaluation en semaine 12

Annexe III : Résumé des recommandations et preuves concernant les modalités de prise en charge du LCA opéré (van Melick et al 2016).

Conclusions and recommendations	Level of evidence
Preoperative rehabilitation	
A preoperative extension deficit (lack of full extension) is a major risk factor for an extension deficit after ACLR <i>Recommendation: measure the preoperative ROM</i>	2
A preoperative deficit in quadriceps strength of >20% has a significant negative consequence for the self-reported outcome 2 years after ACLR <i>Recommendation: measure quadriceps strength and also HS strength</i>	2
Prehabilitation ensures better self-reported knee function up to 2 years after ACLR <i>Recommendation: refer the patient to a physical therapist when necessary</i>	3
Postoperative rehabilitation	
It is unclear whether there is a benefit of supervised rehabilitation compared to home-based rehabilitation or no rehabilitation at all. A minimally supervised rehabilitation programme may result in successful rehabilitation in specific groups of patients that are highly motivated and live far from a physical therapist	2
When comparing a 19-week with a 32-week rehabilitation programme, there are no differences in terms of laxity, ROM, self-reported knee function, single-leg hop test for distance or isokinetic concentric quadriceps and HS strength <i>Recommendation: continue rehabilitation for 9–12 months, depending on the final return-to-work or play goals of the patient</i>	2
Immediate weight bearing does not affect knee laxity and results in decreased incidence of anterior knee pain <i>Recommendation: immediate weight bearing should only be tolerated if there is a correct gait pattern (if necessary with crutches) and no pain, effusion or increase in temperature when walking or shortly after walking</i>	2
Cryotherapy is effective in decreasing pain immediately after application up to 1 week postsurgery after ACLR, but has no effect on postoperative drainage or ROM <i>Recommendation: cryotherapy could eventually be applied in the first postoperative week to reduce pain</i>	1
Isometric quadriceps exercises are safe from the first postoperative week <i>Recommendation: start isometric quadriceps exercises in this first week for reactivating the quadriceps muscles when they provoke no pain</i>	2
Electrostimulation, in combination with conventional rehabilitation, might be more effective for improving muscle strength for up to 2 months after ACLR than conventional rehabilitation alone. However, its effect on long-term functional performance and self-reported knee function is inconclusive. <i>Recommendation: electrostimulation can be useful as an addition to isometric strength training for re-educating voluntary contraction of the quadriceps muscles during the first postoperative weeks</i>	1
CKC and OKC training can be used for regaining quadriceps strength	1
After ACLR, OKC exercises can be performed from week 4 postoperative in a restricted ROM of 90–45° <i>Recommendation: When the quadriceps is reactivated, concentric and eccentric exercises should be used to replace the isometric exercises, provided that the knee does not react with effusion or (an increase in) pain. CKC exercises can be performed from week 2 postoperative. For BPTB, OKC exercises can be started from 4 weeks postoperative in a restricted ROM of 90–45° and extra resistance is allowed, for example, at a leg extension machine. For HS, OKC exercises also can be started from 4 weeks postoperative in a restricted ROM of 90–45°, but no extra weight should be added in the first 12 weeks to prevent graft elongation. ROM can be increased to 90–30° in week 5, to 90–20° in week 6, to 90–10° in week 7 and to full ROM in week 8 for both graft types</i>	2
Neuromuscular training should be added to strength training to optimise self-reported outcome measurements	1
Altered neuromuscular function and biomechanics after ACLR could be a risk factor for second ACL injury (graft rupture or contralateral rupture) <i>Recommendation: neuromuscular training should be added to strength training. Pay attention to a correct quality of movement for prevention of reinjuries</i>	2
Psychological factors as self-efficacy, locus of control and fear of reinjury have influence on the rehabilitation process and return to play after ACLR <i>Recommendation: evaluate psychological changes during rehabilitation with an objective instrument</i>	2
Criteria for return to play	2
An extensive test battery should be used to determine the return-to-play moment, but there are no tests or test batteries that have been tested for construct or predictive validity for return to play	2
It is not clear which cut-off point of the LSI should be used for strength and hop tests <i>Recommendation: perform an extensive test battery for quantity and quality of movement. This test battery should include at least a strength test battery and a hop test battery and measurement of quality of movement. An LSI of >90% could be used as a cut-off point. For pivoting/contact sports, an LSI of >100% is recommended</i>	3

ACLR, anterior cruciate ligament reconstruction; BPTB, bone-patellar tendon-bone; CKC, closed kinetic chain; HS, hamstring; LSI, Limb Symmetry Index; OKC, open kinetic chain; ROM, range of motion.

Annexe IV : Description des Hops test (Rambaud et al. 2016).

Le Single hop test for distance (SHT)

Avant tout test, un échauffement de 10 minutes est réalisé sur vélo stationnaire ou tapis roulant, puis le patient réalise 3 allers-retours à cloche-pied sur une distance d'environ 6 m afin de nous assurer de ses capacités à réaliser ce test. Il est important qu'il n'y ait pas de douleurs lors de la réalisation des sauts et de s'assurer de la stabilisation du bassin afin d'éviter le valgus du genou dynamique.

Le test commence par le membre sain. Le patient est en appui sur son membre inférieur, en équilibre sur un pied. S'il le souhaite, le patient peut utiliser son membre inférieur controlatéral pour s'aider et s'équilibrer. Pour la position des membres supérieurs, il existe plusieurs variantes. Ils peuvent être libres, les mains croisées sur les épaules, ou les mains derrière le dos. Nous avons choisi, dans notre pratique, de demander à nos patients de mettre les mains croisées sur les épaules (fig. 1), permettant de supprimer l'aide des membres supérieurs lors de la phase de propulsion, et lors de la réception.

Nous donnons comme consigne de sauter le plus loin possible, en réceptionnant le saut sur le même pied, en équilibre et en une seule fois. S'il stabilise en plusieurs fois, si les mains quittent les épaules ou que l'équilibre n'est pas maintenu 3 secondes, l'essai est invalidé. Nous mesurons ensuite le saut, de la ligne jusqu'à la pointe du pied. Une variante existe : la mesure se fait de la ligne de départ jusqu'au talon. Dans notre pratique, nous prenons la pointe de pied comme repère, comme décrit par Noyes et al. [2]. Quoi qu'il en soit, il est très important de toujours utiliser la même procédure.

Après 2 essais de familiarisation, le patient a 3 essais. Nous retenons seulement l'essai dont la distance est la plus importante (en cm). Si le dernier essai est le meilleur, nous proposons un essai supplémentaire, et ainsi de suite, afin d'obtenir la meilleure distance possible parfaitement exécutée par le patient. Cela permet d'éviter le biais d'apprentissage et permet de rassurer le patient avec une progressivité de la tâche. Puis, nous effectuons les essais du côté opéré avec la même procédure.



► **Figure 1**

Le Single hop test for distance (SHT)

Le patient se tient équilibré sur un pied, mains croisées sur les épaules (1), puis effectue un saut le plus loin possible (2), et doit se stabiliser en une seule fois en gardant les mains sur les épaules. Puis, on mesure la distance du saut (d)

Nous calculons ensuite l'indice de symétrie ou *Limb symmetry index* (LSI) du SHT :

$$LSI_{SHT} = \frac{\text{meilleure distance SHT opérée}}{\text{meilleure distance SHT sain}}$$

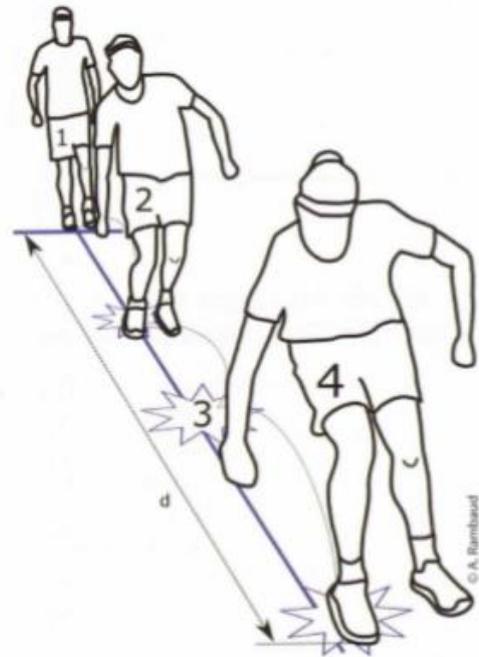
Ce test ne permettant pas l'utilisation des bras pour donner de l'élan lors de la phase de propulsion, ni pour garder l'équilibre, donne une bonne indication sur la force du membre inférieur [6, 7] dans ces 2 phases : de propulsion (concentrique) et de stabilisation (excentrique).

Le Triple hop test for distance (THT)

Il se fait généralement après le SHT. Nous commençons par le membre sain. La position de départ est debout, en équilibre sur le pied du membre sain, et les mains libres. On lui demande de réaliser 3 sauts à cloche-pied enchaînés, droit devant lui, et de stabiliser le dernier saut (fig. 2). La réception doit être faite en une seule fois. L'essai est invalidé si les sauts ne sont pas enchaînés, si lors de la réception les mains touchent le sol, si la réception ne se fait pas en une seule fois ou que l'équilibre n'est pas maintenu plus de 3 secondes. Les essais sont effectués comme pour le SHT, ainsi que le mode de mesure. Nous calculons ainsi le LSI du THT :

$$LSI\ THT = \frac{\text{meilleure distance THT opérée}}{\text{meilleure distance THT sain}}$$

Le THT, nous renseigne sur d'autres stratégies d'application de force que le SHT. En effet, le THT autorise l'aide des bras, et nous renseigne sur les capacités pliométriques du membre inférieur avec la succession des sauts. De bonnes corrélations ont été également rapportées par Petshing et al. [7, 8] entre le THT et les évaluations de la force musculaire isocinétique de la flexion de genou.



► Figure 2

Le Triple hop test for distance (THT)

Le patient se tient équilibré sur pied, mains libres (1), puis effectue 3 sauts le plus loin possible (2-3) et doit stabiliser le dernier en une seule fois (4). Puis, on mesure la distance du saut (d).

Annexe V : Grille d'évaluation des risques liés à l'utilisation du BFR (Nakajima et al; traduite en français par KINESPORT).

Historique de thrombose veineuse profonde. Fièvres ou maladie aiguë. Pression sanguine > 180/100 mmHg. Post-opératoire immédiat. Arythmie importante ou ischémie coronarienne.	5 points
Grossesse.	4 points
Varices. Inactivité prolongée. Fibrillation auriculaire ou insuffisance cardiaque. Pression sanguine >160-170/95-99 mmHg.	3 points
Age > 60 ans, IMC > 30kg/m ² , malignité, hyperlipidémie, œstrogène thérapie.	2 points
Age 40-59 ans, sexe féminin, BMI 25-30kg/m ² .	1 point

Annexe VI : Echelle PEDro

Échelle PEDro – Français

1. les critères d'éligibilité ont été précisés	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
2. les sujets ont été répartis aléatoirement dans les groupes (pour un essai croisé, l'ordre des traitements reçus par les sujets a été attribué aléatoirement)	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
3. la répartition a respecté une assignation secrète	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
4. les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
5. tous les sujets étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
6. tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
7. tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
8. les mesures, pour au moins un des critères de jugement essentiels, ont été obtenues pour plus de 85% des sujets initialement répartis dans les groupes	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
9. tous les sujets pour lesquels les résultats étaient disponibles ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle conformément à leur répartition ou, quand cela n'a pas été le cas, les données d'au moins un des critères de jugement essentiels ont été analysées "en intention de traiter"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
10. les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
11. pour au moins un des critères de jugement essentiels, l'étude indique à la fois l'estimation des effets et l'estimation de leur variabilité	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:

Annexe VII : Vue d'ensemble des caractéristiques des études.

Auteurs	Design	Nombre de sujet	Groupes	Paramètres évalués
<i>Hughes et al</i> 2019	Essai contrôlé randomisé	28	- ACLR, BFR+LL (14) - ACLR, HL (14)	- perception de l'effort - douleur genou - douleur musculaire
<i>Kilgas et al</i> 2019	Etude de cohorte	18	- ACLR, BFR (9) - ssin BFR (9)	- épaisseur droit fémoral + vaste latéral - force des extenseurs du genou - LSI
<i>Hughes et al</i> 2018	Essai contrôlé à randomisation partielle	30	- BFR+LL ssin (10) - ACLR, BFR+LL (10) - ACLR, HL (10)	- perception de l'effort - douleur genou - douleur musculaire
<i>Korakakis et al</i> 2018	Essai contrôlé randomisé	40	- AKP BFR+LL (20) - AKP LL (20)	Douleur de genou
<i>Zargi et al</i> 2018	Etude prospective à randomisation partielle	20	- ACLR, BFR, - ACLR, occlusion fictive	- MVIC du Quadriceps - endurance quadriceps - activation du VM - flux sanguin du VL
<i>Iversen et al</i> 2016	Essai contrôlé randomisé	24	- ACLR, BFR+LL - ACLR, LL	- CSA (=anatomical cross section area)
<i>Ohlin et al</i> 2003	Essai contrôlé randomisé	44	- ACLR, BFR (22) - ACLR, standard (22)	- Pic de force : fléchisseurs et extenseurs du G - CSA : gp fl. ext, add - diamètre Fb musculaire

ACLR = *anterior cruciate ligament reconstruction* (reconstruction du ligament croisé antérieur) ; BFR = *blood flow restriction* (restriction du flux sanguin) ; LL = *low load* (charge légère) ; HL= *heavy load* (charge lourde) ; AKP = *anterior knee pain* (douleur antérieure de genou) ; LSI = *limb symmetry index* (index de symétrie des membres) ; MVIC = *muscular voluntary isometric contraction* (force maximale isométrique volontaire) ; VM = vaste médial ; VL = vaste latéral ; CSA = *cross-sectional area*

Annexe VIII : Evaluation de la qualité méthodologique des études (PEDro).

Auteurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Score
<i>Hughes et al 2019</i>	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	8
<i>Kilgas et al 2019</i>	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	5
<i>Hughes et al 2018</i>	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	6
<i>Korakakis et al 2018</i>	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	9
<i>Zargi et al 2018</i>	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	Item valide	7
<i>Iversen et al 2016</i>	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item valide	6
<i>Ohm et al 2003</i>	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item non valide	Item valide	Item valide	Item non valide	5

Légende :  Item non valide  Item valide

Annexe IX : Document d'information et de consentement

Document d'information et de consentement

Titre de l'étude :

Promoteur de l'étude :

Investigateur :

Information claire et loyale

➤ Introduction :

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche destiné à étudier les effets de l'occlusion vasculaire (BFR = *Blood Flow Restriction*) sur la reprise de la course à pied.

Nous vous invitons à lire ces quelques pages afin de prendre connaissance du déroulement générale de l'étude et de ce que cela implique.

Veuillez lire attentivement ce document et n'hésitez pas à poser toutes les questions que vous souhaitez à l'investigateur ou à la personne qui le représente. Ce document comprend 2 parties : une note d'information sur l'étude et votre consentement écrit.

➤ Informations liées à votre éventuelle participation :

Cette étude clinique est mise en place après avoir été validée par un ou plusieurs comité de protection de personne (CPP).

Votre décision de participer est volontaire et libre de toute contrainte, et nécessite la signature du formulaire de consentement. Même après signature de ce document, vous êtes en droit d'arrêter de participer à l'étude en informant l'investigateur. Votre décision d'arrêter n'impactera en aucun cas votre prise en charge, ni votre relation avec l'investigateur.

L'ensemble de vos données recueillis à l'occasion de cette étude sont confidentielles et votre anonymat sera préservé à la publication des résultats

Description du protocole d'étude

➤ Objectif de l'étude:

L'objectif de cette étude est d'analyser les effets du BFR en rééducation sur les critères de reprise de course à pied.

➤ Déroulement :

Suite à votre inclusion à cette étude, vous serez réparti de manière aléatoire en 2 groupes : l'un utilisant le BFR et l'autre non. La durée de l'étude est de 12 semaines. Elle débutera après votre opération par la première séance de rééducation et se terminera par la réalisation des tests de reprise de course à pied.

En fonction de votre groupe, vous suivrez votre rééducation post-opératoire, en utilisant ou non le BFR. Vous serez vu sur 3 séances la première semaine, puis 2 fois les semaines suivantes. Au cours de ces séances, vous serez amené à réaliser des sessions de renforcement musculaire de la manière suivante :

- Semaine 1 : réalisation de l'exercice de l'écrase coussin sur table, avec ou sans BFR
- Semaine 2 et 3 : réalisation d'exercices sur une machine de *Leg press* (presse à jambe) avec ou sans BFR, et avec augmentation progressive de charge.
- A partir de la semaine 4 : réalisation d'exercice sur une machine de *Leg extension*, avec ou sans BFR, et avec augmentation progressive de charge
- Semaine 12 : réalisation de l'évaluation pendant la dernière séance

L'évaluation en semaine 12 se compose d'une évaluation fonctionnelle, puis d'une évaluation de la force musculaire de vos extenseurs de genou.

L'évaluation fonctionnelle consiste à réaliser 2 tests de saut : le *Single hop test for distance* et le *Triple hop test for distance*. Ces tests sont réalisés sur chacune de vos jambes. La distance réalisée au cours de ces tests sera mesurée. A partir de cette mesure, nous calculons votre LSI (*Limb Symmetry Index*), qui correspond à l'index de symétrie de vos membres inférieurs.

L'évaluation de la force musculaire de vos extenseurs de genou se fait avec un dynamomètre manuel, en suivant un protocole défini. Les meilleures valeurs de force obtenues permettent de calculer votre LSI, qui correspond cette fois à la symétrie de force de vos 2 quadriceps.

➤ Risques et inconvénients :

L'utilisation du BFR ne présente pas plus de risque qu'une séance de renforcement musculaire nécessitant de soulever de lourdes charges. Les douleurs musculaires sont possibles après utilisation, mais disparaissent rapidement, en quelques jours.

➤ Bénéfices :

De récentes études se sont intéressées à l'utilisation du BFR après une reconstruction d ligament croisé antérieur. Il en ressort que cette modalité de renforcement musculaire permettrait de récupérer efficacement en force et en trophicité musculaire, et de diminuer les douleurs de genou. Les effets du BFR sur les critères de reprise de course à pied après l'opération n'ont pour le moment jamais été étudiés.

➤ Contact :

Si vous avez besoin d'informations complémentaires, vous pouvez contacter JAFFREDO Florian par courriel à jaffredo.florian@orange.fr

Document d'information et de consentement

Consentement éclairé

Participant

Je soussigné(e) (*Nom et prénom du sujet*),

Déclare avoir été informé de la nature de l'étude, ses objectifs et ses modalités par Mme/Mr
..... (*Nom et prénom de l'investigateur*).

J'ai pu connaître et compris la note d'information qui m'a été remise.

J'accepte que les informations me concernant puissent être accessibles, selon les modalités décrites précédemment, par les investigateurs et promoteurs de l'étude. J'accepte aussi que ces informations me concernant puissent faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche.

Ma participation est volontaire, et je suis libre d'accepter ou de refuser de participer, et je suis libre d'arrêter à tout moment ma participation en cours d'étude. Cela n'influencera pas la qualité des soins qui me seront prodigués.

Après avoir reçu une information claire et loyale, j'accepte librement et volontairement de participer à la recherche qui m'est proposée.

Investigateur

Je soussigné,, investigateur de la recherche, confirme avoir fourni oralement les informations nécessaires sur l'étude et avoir fourni un exemplaire du document d'information au participant.

Je confirme qu'aucune pression n'a été exercée pour que le patient accepte de participer à l'étude et que je suis prêt à répondre à toutes les questions supplémentaires, le cas échéant.

Je confirme travailler en accord avec les principes éthiques énoncés dans la « Déclaration d'Helsinki », dans les « Bonnes pratiques Cliniques ».

Fait à,

Le

Nom et signature de l'investigateur

Signature du sujet

Annexe X : Protocole de détermination de la 1RM

Protocole de détermination de la 1RM

Précautions :

Les thérapeutes veilleront à ce que les sujets ne réalisent pas d'entraînement musculaire 48h avant la session de détermination de la 1RM.

1RM sur Leg Press

Echauffement :

5 minutes de vélo à résistance et cadence libre, puis 10 répétitions sur *Leg Press* à poids libre.

Procédure :

En questionnant le patient sur ses capacités et sur l'effort perçut lors des 10 répétitions de l'échauffement, le thérapeute estime une 1RM sur *Leg press*. Dès lors qu'une valeur de 1RM est estimée, une charge égale à 80% de cette 1RM est appliquée. Le sujet tente alors de soulever cette charge 5 fois :

- Si le sujet est capable de soulever cette charge plus de 5 fois, la charge est augmentée de 10 à 20% pour une autre tentative.
- Si au contraire, le sujet n'arrive pas à réaliser ces 5 répétitions, la charge est diminuée de 10 à 20% pour une autre tentative.

A chaque tentative, le thérapeute donne des encouragements verbaux. Les tentatives sont également standardisées en suivant la cadence donnée par un métronome, réglé sur la base de 30 répétitions par minutes. Une période de repos de 5 minutes est respectée entre chaque tentative.

Calcul :

Une fois que la valeur de la 5RM est obtenue, la 1RM est calculée par la formule suivante (formule de Reynolds) :

$$1RM = (1,09703 \times (5RM \text{ en Kg})) + 14,2546$$

1RM sur Leg extension

La même procédure que celle décrite précédemment est réalisée mais sur une machine de Leg extension.

Annexe XI : Test de vérification de l'épanchement du genou

Procédure d'évaluation de l'épanchement intra-articulaire du genou

En cas de doute sur un possible gonflement /épanchement de genou de la part du sujet et/ou du thérapeute, ce dernier vérifiera la présence de l'épanchement articulaire en réalisant le test de la fluctuation décrit ci-dessous.

Le test de la fluctuation

L'objectif de ce test est de mettre en évidence la présence d'un épanchement intra-articulaire du genou.

Le patient est installé en décubitus dorsal. L'examineur vient placer le pouce et les doigts de l'une de ses mains de part et d'autre de la partie inférieure de la patella. Avec son autre main, il vient comprimer le cul de sac sous-quadriceps.

Le test est positif si le pouce et les doigts de la main caudale du thérapeute sont déviés par l'épanchement de chaque côté de la patella.

Annexe XII : Protocole d'évaluation de la force isométrique du Quadriceps et de calcul du *Limb Symmetry Index* (LSI)

Protocole d'évaluation de la force isométrique du Quadriceps et de calcul du *Limb Symmetry Index* (LSI)

L'évaluation de la force maximale isométrique du quadriceps sera réalisée lors de la dernière séance de l'étude, la séance n°25, à la fin de la semaine 12. Cette évaluation fera suite à la réalisation des *Hops Tests*. Cette évaluation permettra de calculer l'index de symétrie de la force du quadriceps entre les 2 membres inférieurs, et permettra par la suite d'autoriser ou non, une reprise de la course à pied.

Cette évaluation doit être réalisée par un évaluateur n'ayant pas connaissances de l'allocation des groupes. Ce dernier doit réaliser l'évaluation en aveugle.

Matériel :

Le matériel nécessaire à la réalisation de l'évaluation est le suivant :

- Table d'examen
- 2 sangles inextensibles, larges et ajustables
- 1 mètre ruban
- 1 chronomètre
- 1 Dynamomètre portatif avec bord incurvé (*référence : microfet 2*)

Installation :

Le sujet est en position assise sur une table d'examen, sans appui dorsal, avec les jambes en bout de table. Le patient croise ses bras devant le torse. La hanche et le genou sont positionnés à 90° de flexion. Un coussin triangulaire est placé sous la cuisse du sujet afin de maintenir son horizontalité.

Deux sangles de stabilité inextensibles et ajustables sont positionnées : l'une sur la cuisse afin de l'immobiliser et réduire les compensations, et l'autre sur le segment jambier afin de maintenir la flexion du genou à 90° durant le test.

Mesure du bras de levier :

La mesure implique de connaître la longueur du bras du levier. De ce fait, une mesure entre l'interligne articulaire du genou et le point médian d'application dynamomètre sera réalisée avant le test avec un mètre ruban. Le point d'application du dynamomètre se situe sur la partie antérieure du segment jambier, 2 cm au-dessus de la malléole latéral. Cette mesure est exprimée en mètre (m).

Procédure :

La procédure de mesure sera réalisée sur les 2 jambes, et commencera du côté sain. L'installation du sujet est vérifiée et le bras de levier est mesuré. L'évaluateur place le dynamomètre entre la sangle et la partie antérieur du segment jambier. L'évaluateur prend soin de bien vérifier que le genou et la hanche sont toujours bien positionnés.

Le sujet devra réaliser sur chaque jambe 3 contractions isométriques maximales de 5 secondes. Une période de repos de 60 secondes sera accordée entre chaque contraction. Le dynamomètre affichera une valeur en Nm que l'évaluateur relèvera. L'évaluateur donnera les consignes suivantes au sujet :

« L'objectif de ce test est d'évaluer la force d'extension de votre genou. Vous allez devoir tendre le genou le plus fort que vous pourrez et devrez maintenir cette contraction pendant 5 secondes. Je vous encouragerai et vous indiquerai quand vous devrez pousser et quand vous devrez relâchez. Vous aurez 3 essais ».

Recueil de donnée :

Le dynamomètre affichera des valeurs exprimées en Newton-mètre (Nm). L'évaluateur relèvera chacune des 3 valeurs obtenues. Il prendra soin de vérifier qu'il n'y a pas de différence >10% entre chaque valeur. Si une différence >10% est observée sur le même membre, une mesure supplémentaire sera réalisée, dans les mêmes conditions.

La meilleure des valeurs obtenues sera gardée comme valeur de référence. Cette valeur exprimée en Nm sera ensuite normalisée en Kg de la manière suivante

$$\text{Force maximale (Kg)} = \frac{\text{Meilleure valeur (Nm)}}{\text{Poids (Kg)}} \times 100$$

Une fois la valeur de force du quadriceps normalisée en Kg, le pic de force (*peak torque*) sera calculé en multipliant la force (Kg) par l'accélération (9,81) et par la mesure du bras de levier (m) :

$$\text{Force (Kg)} \times 9,81 \times \text{bras de levier (m)}$$

Dès que le calcul du pic de force des deux quadriceps est effectué, le calcul du *Limb Symmetry Index* (LSI) sera réalisé avec la formule suivante :

$$\text{LSI} = \frac{\text{Pic de force du membre atteinte}}{\text{Pic de force du membre non - atteint}} \times 100$$

Annexe XIII : Vue d'ensemble des protocoles d'étude

Auteurs	Durée	Occlusion	Caractéristiques du brassard	protocoles
<i>Hughes et al</i> 2019	8 semaines	80% LOP	11,5x86cm Ep : 5mm	4 sets (30-15-15-15) de leg press, à 30% 1RM avec BFR 2/semaine
<i>Kilgas et al</i> 2019	4 semaines	50% LOP	18cm	3 exercices (Extension genou, squat bipodal, marche) avec BFR. A domicile, 5/semaine
<i>Hughes et al</i> 2018	24H	80% LOP	11,5x86cm Ep : 5mm	4 sets (30-15-15-15) de leg press, à 30% 1RM avec BFR.
<i>Korakakis et al</i> 2018	45 minutes	80% LOP	10x116cm	4 sets : 1 ^{er} à l'échec + 3x15 de leg extension avec BFR avec R via poids de cheville
<i>Zargi et al</i> 2018	12 semaines	150mmHg Fictive : 20mmHg	14cm	6 séries à l'échec, leg extension en CCO sans R, avec BFR.
<i>Iversen et al</i> 2016	14 jours	150mmHg Augmentation progressive Max 180mmHg	14cm	20 extension genou en isométrique pendant 5min de BFR. 2/jour
<i>Ohira et al</i> 2003	16 semaines	180mmHg	NR	SLR : 2sets /j, 6/sem de S1 à S8 (augmentation prog charge) Adduction de hanche : 20x5sec, 2sets/jours, 6/sem de S1 à S12 1/2 squat : maintien 6 sec, 2/jour, 6/sem, de S5 à S16 Elastic tube exercice : 20rep, 1/j, 6/sem de S13 à S16 Marche avec flexion de genou : 60pas, 3/j, 6/sem, de S13 à S16

LOP = limb occlusion pressure (pression d'occlusion du membre) ; Ep = épaisseur ; NR = non renseignée ; RM = répétition maximale ; BFR = blood flow restriction (restriction du flux sanguin) ; CCO = chaîne cinétique ouverte ; R = résistance ; SLR = single leg rise

Annexe XIV : Synthèse des résultats des études

Auteurs	Force musculaire	Endurance musculaire	Réponses perceptuelles	Trophicité musculaire	Activation musculaire
<i>Hughes et al</i> 2019			- RE : aclr BFR, aclr HL - Dl m : aclr BFR > san BFR, et > aclr HL (p) - Dl G : aclr BFR < aclr HL		
<i>Kilgas et al</i> 2019	- force des ext de G : Augmentat° global du LSI, mais pas diff entre les gp			- épaisseur : récupérat° Mb OP > Mb sains (p) Une amélioration globale, mais pas de diff entre les gp	
<i>Hughes et al</i> 2018			- PE : aclr BFR, aclr HL Aclr BFR > san BFR (p) - Dl m : aclr BFR > aclr HL (p) - Dl G : aclr BFR < aclr HL		
<i>Korakakis et al</i> 2018			- Dl G : diminution gp BFR > gp hl (p)		
<i>Zargi et al</i> 2018	MVIC : diminut° globale	- tps : diminut° pour gp C Pas diminution significative gp BFR			- EMG : > pour le gp BFR (p)
<i>Iversen et al</i> 2016				CSA : - Q : diminution significative pour 2 gp gp BR : gp C	
<i>Ohta et al</i> 2003	- F isok Q : récupérat° gp BFR > gp C (p) - F isom Q : récupérat° gp BFR > gp C (p) - F isok FI : récupérat° gp BFR > gp C (p) - F isom FI : récupérat° gp BFR > gp C (p)			CSA : - extenseur de G : améliorat° de trophicité gp BFR > gp C - flectisseur : réduit° atrophie gp BFR : gp C Diamètre Fb m : récupérat° gp BFR > gp C	

Pe = perception de l'effort ; Dl m = douleur musculaire ; Dl G = douleur de genou ; Gp BFR = groupe utilisant le BFR ; gp C = groupe contrôle ; aclr = *anterior cruciate ligament reconstruction* (reconstruction chirurgicale du LCA) ; HL = *heavy load* (charge lourde) ; MVIC = *maximal voluntary isometric contraction* (force maximale volontaire isométrique) ; F = force ; (p) = indique que la différence est significative ; mb OP = membre opéré ; CSA = *cross-sectional area* ; Fb m = fibre musculaire ; EMG = électromyographie

JAFFREDO Florian
INTERET DU <i>BLOOD FLOW RESTRICTION</i> SUR LA REPRISE DE COURSE A PIED APRES UNE RECONSTRUCTION DU LCA : REVUE DE LITTERATURE ET PROTOCOLE
<p>Introduction: Muscle strength recovery is one of the main challenges after anterior cruciate ligament reconstruction. Blood flow restriction (BFR) training is considered as an effective and safe training and rehabilitation method. The purpose is to investigate the effectiveness of BFR on return to running after an anterior cruciate ligament reconstruction. Method: A non-systematic review was conducted across Pubmed, Pedro and Cochrane databases to identify studies on BFR in patient undergoing anterior cruciate ligament reconstruction. Results: A total of 7 studies were included. Benefits on strength gain, hypertrophy and pain are observed, but no studies are looking at return to running criteria. We suggest a research protocol interesting on BFR effects on return to running. Discussion: Current literature data show that BFR would improve strength and hypertrophy, but studies are heterogeneous and small in number. Our study is the first which deals with the effects of BFR on return to running, and could provide the first evidence about efficiency of BFR on return to running.</p>
<p>Introduction : La récupération de force musculaire est l'un des principaux enjeux après la reconstruction du ligament croisé antérieur. L'entraînement sous occlusion vasculaire (BFR) est considéré comme une méthode d'entraînement et de rééducation efficace et sécurisée. L'objectif est d'examiner l'efficacité du BFR sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA. Méthode : Une revue non systématique a été menée sur les bases de données Pubmed, Pedro et Cochrane pour identifier les études sur l'utilisation du BFR chez des sujets opérés du ligament croisé antérieur. Résultat : Un total de 7 études a été inclus. Des bénéfices sur le gain de force, l'hypertrophie et les douleurs sont observés, mais aucune étude ne s'intéresse aux critères de reprise de course à pied. Nous proposons un protocole de recherche s'intéressant aux effets du BFR sur la reprise de course à pied. Discussion : Les données de la littérature actuelles montrent que le BFR permettrait d'améliorer la force et l'hypertrophie, mais les études sont encore hétérogènes et peu nombreuses. Notre étude est la première à s'intéresser aux effets du BFR sur la reprise de course, et pourrait fournir les premières preuves concernant l'efficacité du BFR sur la reprise de course à pied.</p>
<p>KEYWORDS : anterior cruciate ligament reconstruction - blood flow restriction - running - limb symmetry index</p>
<p>MOTS-CLEFS : reconstruction du ligament croisé antérieur - restriction du flux sanguin - course à pied - index de symétrie du membre</p>
<p>INSTITUT DE FORMATION EN MASSO-KINESITHERAPIE - 22 avenue Camille Desmoulins 292380 BREST CEDEX 3 - TRAVAIL ECRIT DE FIN D'ETUDE - Juin 2020</p>