



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale
- Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation
Département Masso-Kinésithérapie

Mémoire N°1931

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie

Par

CARRE Anthony

Dans quelle mesure l'utilisation du Blood Flow Restriction permet-elle d'optimiser les critères physiques et psychologiques des patients lors du retour à la course dans un contexte de rééducation post-opératoire du LCA ?

Proposition d'un protocole pour un essai contrôlé randomisé

To what extent can the use of Blood Flow Restriction optimize patients' physical and psychological criteria during the phase of return to run in the context of post-operative ACL rehabilitation? Proposed protocol for a randomized controlled trial

Directeur / Directrice de mémoire

FRIANT Yola

BEASSE Valentin

Année 2023-2024

Session 1

Membres du jury

BEASSE Valentin

GIGNOUX Estelle

CRESPO ANDRIEU Séverine

CHARTRE ANTI-PLAGIAT DE LA DREETS AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

La Direction Régionale de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités délivre sous l'autorité du préfet de région les diplômes paramédicaux et du travail social.

C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue, que les directives suivantes sont formulées.

Elles concernent l'ensemble des candidats devant fournir un travail écrit dans le cadre de l'obtention d'un diplôme d'État, qu'il s'agisse de formation initiale ou de parcours VAE.

La présente charte définit les règles à respecter par tout candidat, dans l'ensemble des écrits servant de support aux épreuves de certification du diplôme préparé (mémoire, travail de fin d'études, livret2).

Il est rappelé que « le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable »¹.

La contrefaçon (le plagiat est, en droit, une contrefaçon) **est un délit** au sens des articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle.

Article 1 :

Le candidat au diplôme s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

Article 2 :

Le plagiaire s'expose à des procédures disciplinaires. De plus, en application du Code de l'éducation² et du Code de la propriété intellectuelle³, il s'expose également à des poursuites et peines pénales.

Article 3 :

Tout candidat s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, cette charte dûment signée qui vaut engagement :

Je soussigné(e) : CARRE Anthony

atteste avoir pris connaissance de la charte anti-plagiat élaborée par la DREETS Auvergne-Rhône-Alpes et de m'y être conformé(e).

Je certifie avoir rédigé personnellement le contenu du livret/mémoire fourni en vue de l'obtention du diplôme suivant :

Fait à Vénissieux

Le 06/05/2024

Signature



¹ Site Université de Nantes : <http://www.univ-nantes.fr/statuts-et-chartes-usagers/dossier-plagiat-784821.kjsp>

² Article L331-3 : « les fraudes commises dans les examens et les concours publics qui ont pour objet l'acquisition d'un diplôme délivré par l'Etat sont réprimées dans les conditions fixées par la loi du 23 décembre 1901 réprimant les fraudes dans les examens et concours publics »

³ Article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation
Département Masso-Kinésithérapie

Mémoire N°1931

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie

Par

CARRE Anthony

Dans quelle mesure l'utilisation du Blood Flow Restriction permet-elle d'optimiser les critères physiques et psychologiques des patients lors du retour à la course dans un contexte de rééducation post-opératoire du LCA ? Proposition d'un protocole pour un essai contrôlé randomisé

To what extent can the use of Blood Flow Restriction optimize patients' physical and psychological criteria during the phase of return to run in the context of post-operative ACL rehabilitation? Proposed protocol for a randomized controlled trial

Directeur / Directrice de mémoire

FRIANT Yola

BEASSE Valentin

Année 2023-2024

Session 1

Membres du jury

BEASSE Valentin

GIGNOUX Estelle

CRESPO ANDRIEU Séverine

Université Claude Bernard Lyon 1

Président

Frédéric FLEURY

Vice-président CA

REVEL Didier

Secteur Santé

Institut des Sciences et Techniques de
Réadaptation

Directeur

Jacques LUAUTE

U.F.R. de Médecine Lyon Est

Directeur

RODE Gilles

U.F.R d'Odontologie

Directeur

Jean Christophe MAURIN

U.F.R de Médecine Lyon-Sud

Charles Mérieux

Directrice

PAPAREL Philippe

Institut des Sciences Pharmaceutiques et
Biologiques

Directrice

DUSSART Claude

Département de Formation et

Centre de Recherche en

Biologie Humaine

Directeur

SCHOTT Anne-Marie

Comité de Coordination des

Etudes Médicales (CCEM)

COCHAT Pierre



Institut Sciences et Techniques de la Réadaptation

Département MASSO-KINESITHERAPIE

Directeur ISTR

Jacques LUAUTE

Équipe de direction du département de Masso-kinésithérapie :

Directeur de la formation

Charles QUESADA

Responsable des travaux de recherche

Denis JAUDOIN

Référents d'années

Ilona BESANCON (MK3)

Edith COMEMALE (MK4)

Denis JAUDOIN (MK5)

Antoine YAZBECK (MK2)

Référente de la formation clinique

Ayodélé MADI

Responsable de scolarité

Rachel BOUTARD

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont pu contribuer de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, mes directeurs de mémoire, FRIANT Yola et BEASSE Valentin qui m'ont accompagné tout au long de ce travail. Ils m'ont apporté, par leur temps, leurs conseils et leur expertise respective, les moyens d'avancer et de surpasser les limites rencontrées.

L'ensemble de l'équipe pédagogique et les différents enseignants, qui malgré certaines périodes compliquées, ont réussi à nous fournir des enseignements de qualité tout au long de ces 4 années.

Marwan, Holivier, Yanis et Ludovic, mes différents tuteurs de stage qui m'ont permis de grandir en tant que futur professionnel, de faire évoluer ma pratique et ma vision du métier mais aussi d'enrichir mon mémoire au cours de plusieurs échanges et relectures.

Mes parents, ma soeur et l'ensemble de ma famille qui m'ont toujours soutenu et accompagné dans mes études, dans le sport et dans la vie en général. C'est en grande partie grâce à eux si j'ai pu atteindre mes objectifs.

Merci aussi à Colleen (petite montagne), Jeremy (le râleur) et Zinedine qui ont enrichis ma formation par l'ensemble des bons moments que l'on a pu partager durant ces 4 années et que l'on continuera à partager par la suite.

Merci à l'ensemble de l'équipe Kiné Prisca ainsi qu'à Néo et Filo, avec qui j'aurais passé un clinicat incroyable pour clôturer notre apprentissage professionnel en stage.

Enfin, j'aimerais remercier Mathilde, ma rencontre de cette formation, qui est une personne incroyable et qui deviendra sans aucun doute, une superbe kiné.

Liste des acronymes :

1RM	Charge maximale que le patient peut soulever une seule fois
ACL- RSI	Anterior Cruciate Ligament – Return to Sport and Injury
ACLR	Reconstruction du Ligament Croisé Antérieur
ACSM	American College of Sports Medicine
AMI	Arthrogenic Muscle Inhibition
BFR	Blood Flow Restriction
BPTB	Bone-patellar tendon-bone
CCO	Chaine cinétique ouverte
CPP	Comité de Protection des Personnes
DIDT	Droit Interne (gracile) et demi-tendineux
EJT	Elévation Jambe Tendue
EVA	Echelle Visuelle Analogique
FC	Fréquence Cardiaque
IJ	Ischio-Jambiers
IKDC	International Knee Documentation Comittee
LAL	Ligament Antéro-Latéral
LCA	Ligament Croisé Antérieur
LCP	Ligament Croisé Postérieur
LOP	Limb Occlusion Pression / Pression d'occlusion du membre
LSI	Limb Symetry Index
MCID	Différence Minimale Cliniquement Importante
MI	Membre Inférieur
NMES	Neuro Muscular Electrical Stimulation
RPE	Rate Perceive Exertion / Sensation d'effort perçue
RTP	Return to Play / Retour au Sport
RTR	Retour à la course
SLS	Single Leg Squat
TAS	Tegner Activity Scale
TQ	Tendon Quadricipital
VO2 Max	Volume maximal d'oxygène consommé par unité de temps

Table des matières

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1. Complexe du Genou	1
1.1.1. Rappels Anatomiques	1
1.1.2. Biomécanique de l'articulation	1
1.1.3. Cinésiologie lors de la course	2
1.2. Ligament Croisé Antérieur	3
1.2.1. Description Anatomique	3
1.2.2. Rôle mécanique	4
1.2.3. Epidémiologie de la rupture du LCA	5
1.2.4. Mécanismes de rupture et les types opératoires	6
1.2.5. Complications et déficits fréquents post-opératoires	7
1.2.6. Principes de cicatrisation	9
1.2.7. Principes de rééducation classique	10
1.3. Continuum du Retour au Sport (RTP)	13
1.3.1. Théorie du continuum et intérêt du RTP	13
1.3.2. Chiffres du RTP	14
1.3.3. Explication théorique de ces chiffres	15
1.4. Blood Flow Restriction (BFR)	16
1.4.1. Histoire du BFR	16
1.4.2. Mécanismes du BFR (principes, mécanismes, modalités d'application)	16
1.4.3. Ce qui a été prouvé	19
1.4.4. Types de matériels et le système MadUp®	21
1.4.5. Sécurité et BFR	21
1.5. Problématique de notre étude	22
1.5.1. Raisonnement	22
1.5.2. Problématique	22
2. METHODE	23
2.1. Justification théorique du protocole	23
2.2. Présentation générale du protocole	25
2.2.1. Objectifs	25
2.2.2. Hypothèses	25

2.2.3.	Design et Recrutement.....	25
2.2.4.	Critères d'inclusion	27
2.2.5.	Critères d'exclusion	28
2.2.6.	Critères de non inclusion	28
2.2.7.	Critères de précaution	29
2.2.8.	Matériel utilisé.....	29
2.2.9.	Critères d'arrêt d'une séance de BFR lors de l'intervention.....	30
2.2.10.	Résumé de l'étude et Timeline	30
2.3.	Critères de jugement	32
2.3.1.	Principal.....	32
2.3.2.	Secondaires.....	32
2.4.	Protocole Type Proposé.....	33
2.4.1.	Première phase de rééducation (de la 1 ^{ère} à la 4 ^{ème} semaine)	34
2.4.2.	Seconde phase de rééducation (de la 5 ^{ème} à la 9 ^{ème} semaine).....	37
2.4.3.	Troisième phase de rééducation (de la 10 ^e à la 14 ^e semaine)	40
2.4.4.	Evaluation des critères de reprise et décision de RTR (semaines 14 à 16)	43
2.5.	Statistiques et cadre législatif.....	47
2.5.1.	Statistiques	47
2.5.2.	Calcul du nombre de patients à inclure	48
2.5.3.	Randomisation.....	49
2.5.4.	Cadre Conceptuel.....	50
2.5.5.	Estimations temporelles et budgétaires :	51
3.	DISCUSSION	52
3.1.	Intérêt de cette étude	52
3.1.1.	Intérêt de cette étude pour le patient.....	52
3.1.2.	Intérêt de cette étude pour les professionnels	52
3.2.	Comparaison avec un mémoire similaire.....	53
3.2.1.	Différentes Approches	53
3.2.2.	Des protocoles différents.....	56
3.3.	Résultats envisagés.....	58
3.3.1.	Score IKDC.....	60
3.3.2.	Force Musculaire	61
3.3.3.	Douleur/Epanchement.....	63
3.3.4.	Facteurs Psychologiques	63
3.3.5.	Réintroduction de Course.....	64
3.4.	Forces.....	66

3.5. Limites	67
3.6. Perspectives	69
3.6.1. Cliniques	69
3.6.2. Pour la recherche	70
4. CONCLUSION	71
<i>Bibliographie</i>	73
<i>Annexes</i>	103

Liste des tableaux

Tableau I - Critères d'inclusion à l'étude	27
Tableau II - Rééducation en phase aigüe (semaines 0 à 2).....	35
Tableau III - Rééducation en phase aigüe (semaines 2 à 4).....	36
Tableau IV - Rééducation en phase intermédiaire (semaines 5 à 10).....	39
Tableau V - Rééducation en phase avancée (semaines 10 à 14).....	41
Tableau VI - Consignes de charges et répétitions pour la phase 3 du protocole.....	42
Tableau VII - Programme de Réintroduction de la course (semaines 14 à 16)	44
Tableau VIII - Scores utilisés pour évaluer le retour à la course pratique.....	45
Tableau IX - Tableau des séquences de randomisation stratifiées par groupe	49

Liste des figures

Figure 1 - Présentation anatomique du genou	3
Figure 2 - Les différentes phases du processus de cicatrisation du LCA.	9
Figure 3 - Illustration des phases du continuum de RTP.....	13
Figure 4 - Timeline des différentes phases du protocole et leurs objectifs	31
Figure 5 - Présentation graphique des étapes majeures du protocole	46

Résumé (350 mots) :

Contexte : La reconstruction du Ligament Croisé Antérieur (LCA) est fréquente chez les patients jeunes et sportifs. Elle est suivie d'une longue rééducation avec pour objectif le retour au sport (RTP). Les taux de RTP ne sont pas satisfaisants (moins de 50% des patients retournent à une pratique compétitive) du fait de déficits physiques et psychologiques. Ainsi, il semble cohérent de s'intéresser aux phases précoces du processus de RTP. Une des premières étapes de ce dernier est le retour à la course (RTR). Une technique appelée Blood Flow Restriction (BFR) a démontré son intérêt pour le renforcement musculaire ou encore la diminution de douleur en post-opératoire du LCA en induisant un stress métabolique associé à des exercices à faible charge. L'objectif est d'évaluer l'impact d'une rééducation précoce associée au BFR sur les critères physiques et psychologiques prédictifs du RTR. Nous nous intéresserons aussi à l'impact sur la réalisation pratique du RTR.

Méthode : Au vu du peu de données sur le sujet, nous proposons un protocole d'essai contrôlé randomisé en simple aveugle, avec une rééducation intensive durant 14 semaines, précoce après reconstruction, avec un groupe contrôle et un groupe intervention utilisant le BFR. Cette rééducation sera suivie d'un programme de réintroduction de course de 2 semaines. Plusieurs critères physiques et psychologiques seront évalués avant cette réintroduction. Les patients réaliseront leur rééducation au sein de cabinets libéraux avec des « protocoles types » fournis aux thérapeutes constitués d'exercices variés et progressifs.

Résultats/Discussion : Le protocole n'étant pas mis en place, nous ne disposons pas de résultats. Il n'existe aucune donnée scientifique associant le BFR et le RTR après LCA. Cependant, la rééducation précoce avec BFR a démontré des effets positifs sur la fonction subjective, la force musculaire et la douleur qui sont tous des critères autorisant le RTR. Ainsi, le BFR pourrait avoir un impact positif sur les facteurs prédictifs de réussite de RTR. Les données sur la réalisation pratique du RTR sont faibles mais il semble que la résolution des déficits de force musculaire pourrait optimiser cette dernière.

Conclusion : Les résultats éventuels de cette étude pourraient améliorer le processus de rééducation des patients après reconstruction du LCA. Ceci pourrait permettre d'envisager une nouvelle étude évaluant l'impact de la rééducation précoce avec BFR sur la reprise du sport à plus long terme.

Mots-Clés : blood flow restriction / ligament croisé antérieur / rééducation intensive / retour à la course

Abstract (350 words)

Background : ACL reconstruction is frequently performed on young, athletic patients. It is followed by lengthy rehabilitation with the aim of returning to sport (RTP). RTP rates are unsatisfactory (less than 50% of patients return to competitive practice) due to physical and psychological deficits. It seems worthwhile to focus on the early phases of the RTP continuum. One of the first steps is the return to run (RTR). A technique called Blood Flow Restriction (BFR) has demonstrated its value in muscle strengthening and pain reduction in post-op ACL surgery by inducing metabolic stress associated with low-load exercise. The main objective is to evaluate the impact of early rehabilitation associated with BFR on the physical (objective and subjective) and psychological criteria predictive of RTR as well as on the practical realization of RTR.

Method : Given the paucity of data on the subject, we proposed a protocol for a single-blind randomized controlled trial, with intensive rehabilitation for 14 weeks, early after reconstruction, with a control group and an intervention group using BFR. This will be followed by a 2-week running reintroduction program. Several clinical and psychological criteria will be assessed prior to this reintroduction. Patients will practice their rehabilitation in private practices with “standard protocols” provided to physiotherapists made up of varied and progressive exercises.

Results/Discussion : As the protocol has not yet been implemented, we do not have any results. There are no scientific data linking BFR and RTR after ACL. However, early rehabilitation with BFR has demonstrated positive effects on subjective function, muscle strength and pain, which are all criteria authorizing RTR. Thus, the BFR could have a positive impact on the predictors of RTR success. Data on practical realization is weak, but it seems that resolving muscle strength deficits could favor practical realization of a RTR.

Conclusion : The eventual results of this study could help to improve the rehabilitation process for patients after ACL reconstruction. This could make it possible to envisage a new study evaluating the impact of early rehabilitation with BFR on a longer-term with return to sport rates.

Keywords : anterior cruciate ligament / blood flow restriction / intensive rehabilitation / return to run

1. INTRODUCTION

1.1. Complexe du Genou

1.1.1. Rappels Anatomiques

Le genou est une articulation synoviale qui unit le fémur, le tibia et la patella. Elle est composée de deux articulations :

- Une articulation bi-condyloïde avec la fémoro-tibiale
- Une ginglyme (trochlée) avec l'articulation fémoro-patellaire qui favorise l'action du muscle quadriceps en augmentant son bras de levier et en limitant les frottements.

Cette articulation est située entre les articulations de la hanche et du pied et doit ainsi permettre une stabilité du complexe tout en ayant une grande mobilité.

Tout d'abord, au niveau de l'extrémité distale du fémur, nous retrouvons les condyles fémoraux avec leurs surfaces articulaires qui vont s'articuler avec celles des condyles tibiaux. Ces derniers ont des surfaces articulaires asymétriques. En effet, la surface tibiale médiale est légèrement concave tandis que la surface tibiale latérale est légèrement convexe voir plane. Ceci permet d'allier la stabilité (compartiment médial) et la mobilité (compartiment latéral). Les asymétries de surface des condyles permettent des micromouvements de roulement et de glissement dans le genou facilitant les mouvements globaux (Hassebrock et al., 2020).

Deux ménisques sont aussi présents par genou, un médial et un latéral qui sont unis en avant par le ligament transverse du genou. Ils ont un rôle essentiel dans la protection du cartilage en contribuant à l'absorption des chocs, à la transmission de la charge, à la lubrification du complexe articulaire et à la stabilité (Sherman et al., 2020). De nombreux éléments de stabilisation passive appelés ligaments sont présents au niveau du genou. Nous pouvons retrouver par exemple deux ligaments collatéraux et un pivot central (association des ligaments croisés antérieur et postérieur) (Kamina, 2009 ; Kapandji, 2021).

1.1.2. Biomécanique de l'articulation

L'objectif biomécanique principal est de permettre la mobilité des structures osseuses entre elles tout en permettant une stabilité et une production de force nécessaire à la lutte contre la gravité lors des mouvements (Hassebrock et al., 2020). Les amplitudes physiologiques du genou sont de 150° pour la flexion passive, 120 à 140° en actif en fonction de la position de la hanche et entre 0 et 5° en extension. Ces normes seront à rechercher au cours de la rééducation d'un patient (Kamina, 2009 ; Kapandji, 2021).

L'équilibre entre le mouvement et la stabilité est assuré par l'interaction de l'anatomie osseuse, de la surface articulaire, des ligaments, des ménisques et de la musculature environnante. Des défaillances, à l'une ou l'autre de ces variables, peuvent altérer la biomécanique de l'articulation du genou et augmenter les charges ainsi que le stress fonctionnel placés sur les structures saines (Hassebrock et al., 2020).

1.1.3. Cinésiologie lors de la course

Les charges appliquées sur les articulations du genou peuvent être très importantes et celles-ci sont d'autant plus élevées quand l'intensité de l'activité augmente (Hassebrock et al., 2020). Les forces de réaction du sol lors de la course sont de 2 à 3 fois le poids du corps. Les contraintes sur l'articulation fémoro-tibiale sont de 3,5 fois le poids du corps alors qu'elles sont de presque 8,5 fois le poids du corps sur la fémoro-patellaire lors de la course. La course est aussi caractérisée par ses mouvements répétés avec environ 80 pas/minutes en moyenne qui entraîne des charges/contraintes redondantes sur la durée (Pairot de Fontenay et al., 2023).

La course est une activité cyclique au cours de laquelle, contrairement à la marche, il n'y a pas de double appui. Nous aurons une succession de phase d'appui unipodal et de phase d'oscillation (Hanon, 2005). Le rapport appui/oscillation est d'au moins 30/70% à partir de 5km/h contre 60/40% à la marche (Allard et al., 2012). En *Annexe 1*, vous trouverez un graphique présentant les différentes phases du cycle de course.

Il existe une grande importance du système musculaire dans les mouvements du genou. Plusieurs muscles présentent une activité musculaire conséquente lors de la course. Les gastrocnémiens ont un rôle majeur de propulsion à la fin de la phase d'oscillation, tout en stabilisant le pied et en décélérant le mouvement du tibia vers l'avant. Les ischio-jambiers et notamment le biceps fémoral sont actifs durant environ 75% du cycle de la course tandis que les quadriceps (vaste latéral et droit fémoral) le sont moins longtemps sur le cycle mais jouent tout de même un rôle essentiel dans la stabilisation du genou. Quand la vitesse de course augmente, l'intensité de l'activité musculaire augmente aussi, notamment dans son travail excentrique (Hanon, 2005). Des données plus récentes suggèrent en revanche qu'à des intensités modérées, les quadriceps semblent avoir une amplitude d'activation plus importante que les ischio-jambiers. Cependant, ce ratio se réduit avec l'augmentation de l'intensité (Camic et al., 2015). Le détail des durées et intensités d'activation est présent en *Annexe 2*.

1.2. Ligament Croisé Antérieur

1.2.1. Description Anatomique

Au niveau du genou, il existe un pivot central formé par deux ligaments appelés les ligaments croisés. Ce sont deux ligaments de la région intercondyloïde du genou qui sont croisés entre eux dans les plans frontaux et sagittaux. Ces derniers sont localisés à l'intérieur de la capsule articulaire mais à l'extérieur de la membrane synoviale (Kapandji, 2021).

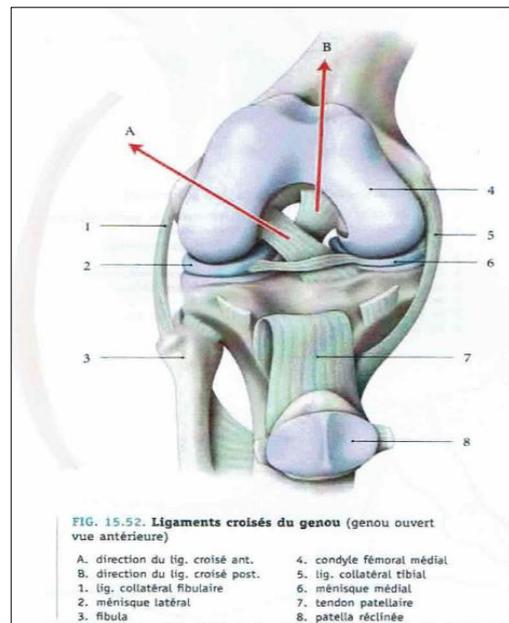
- Ligament Croisé Antérieur (LCA) :

Il prend son origine en avant de l'aire inter-condyloïde puis se dirige obliquement vers le haut, l'arrière et le dehors et se termine sur la face médiale du condyle latéral comme le montre la *figure 1* ci-après, issue de Kamina (2009).

Le nombre de faisceaux du ligament croisé antérieur fait débat dans la littérature. Il serait composé de 3 faisceaux différents d'après Kamina (2009), tandis que certains ont démontré qu'il n'était composé que d'un seul faisceau torsadé (Boisrenoult et al., 2015). Malgré tout, il est généralement admis que le LCA est composé de 2 faisceaux (Hassebrock et al., 2020).

La distance entre l'origine du LCA et son insertion est la plus courte entre 90° et 135° de flexion du genou (Filbay et al., 2023).

L'artère géniculaire moyenne est la principale voie d'approvisionnement en sang du LCA. Il est innervé par le nerf tibial qui fournit des mécanorécepteurs qui contribuent à la fonction proprioceptive du LCA. Il y a peu de fibres douloureuses dans le LCA, ce qui explique pourquoi il y a rarement de la douleur après une déchirure aiguë du LCA jusqu'au déclenchement du processus de cicatrisation avec l'inflammation (Hassebrock et al., 2020).



- Ligament Croisé Postérieur (LCP) :

Figure 1 - Présentation anatomique du genou

Il naît au niveau de la partie postérieure de l'aire inter-condyloïde puis se dirige vers le haut, l'avant et le dedans puis se termine sur la partie antérolatérale du condyle médial. Il posséderait également 3 faisceaux : postéro-externe, antéro-interne et le ligament ménisco-fémoral (Kamina, 2009 ; Kapandji, 2021).

1.2.2. Rôle mécanique

La stabilité sagittale est assurée par les ligaments croisés mais aussi par les muscles ischio-jambiers et quadriceps qui limiteront respectivement les tiroirs antérieurs et postérieurs. La stabilité frontale du genou est assurée par les ligaments collatéraux, le tractus ilio-tibial et les muscles de la patte d'oie. De son côté, la stabilité rotatoire est assurée par l'ensemble des éléments de stabilité du genou, qu'ils soient actifs ou passif (Kamina, 2009 ; Kapandji, 2021).

Les ligaments croisés permettent de maintenir les surfaces de contact entre elles. Ils facilitent aussi les mouvements charnières (glissement des condyles). Ils favorisent, par le déplacement postérieur du centre de rotation du genou, l'harmonie des micromouvements de roulement-glissement lors des mouvements globaux du genou (Hassebrock et al., 2020).

En position de rectitude ou de flexion de 0 à 30°, l'ensemble des faisceaux du LCA sont tendus, alors que seules les fibres postéro-supérieures du LCP sont tendues. A partir de 90° et plus, le LCP devient vertical et se tend proportionnellement plus que le LCA pour lequel seules les fibres supérieures sont tendues. De 20 à 50 degrés de flexion, il y a moins de stabilité à travers l'articulation du genou car les deux ligaments croisés sont moins en tension. Ces changements d'orientation des ligaments croisés assurent la stabilité dynamique du genou dans le plan sagittal (Hassebrock et al., 2020).

Entre 1% et 2% du volume du LCA se compose de mécanorécepteurs. Ainsi, sa rupture réduit la proprioception. La plupart des récepteurs et des terminaisons nerveuses libres sont sub-synoviaux, proches des insertions ligamentaires. La proprioception donne des informations sur le mouvement (kinesthésie), la position du genou dans l'espace (statesthésie) et est importante dans son contrôle musculaire (Fremerey et al., 2000).

La rupture du LCA a un impact biomécanique sur la marche notamment sur l'angle de flexion de genou (Kaur et al., 2016 ; Slater et al., 2017). Ceci pourrait être expliqué par une diminution de la charge sur le membre atteint lors de la marche par appréhension ou par compensation. Une autre explication à cette diminution serait la co-contraction des quadriceps et des ischio-jambiers (IJ) afin d'enraidir le genou et de fournir une stabilité qui n'est plus assurée par le LCA (Takeda et al., 2014). La contraction réflexe des IJ entraîne une raideur globale du genou et un flexum qui va limiter l'extension de genou et donc perturber la marche. Enfin, la kinésiophobie, que pourrait présenter certains patients après la reconstruction, est aussi responsable d'altérations biomécaniques (Tajdini et al., 2021).

Notons que la course engendrerait des contraintes moins importantes que la marche sur le LCA (0,624 N/BW vs 0,774 N/BW) (Roldán et al., 2017).

Ces altérations biomécaniques sont de plus en plus marquées dès lors que l'exigence d'une activité augmente (Takeda et al., 2014). Ainsi, la rupture du LCA a un impact sur la course. Nous retrouverons des troubles cinématiques, cinétiques mais aussi d'activation musculaire lors de la course qui peuvent augmenter les charges sur le genou et surtout induire une moins bonne répartition de celles-ci sur les surfaces articulaires qui ne sont pas adaptées à de telles contraintes (Pairot-de-Fontenay et al., 2019). Après une rupture du LCA, la biomécanique de la course est modifiée, et le temps seul ne permet pas de restaurer ces déficits qui peuvent être observés jusqu'à 5 ans après la reconstruction (Knurr et al., 2021 ; Pairot-de-Fontenay et al., 2019). Les principales dysfonctions notables sont une sous-charge du membre, une flexion diminuée et une production de force (moment d'extension) moindre du côté atteint compensé par des surcharges côté sain (Pairot de Fontenay et al., 2023).

Les asymétries de force des quadriceps et des ischio-jambiers sont proportionnelles à la cinématique et à la cinétique du genou lors de la course (Pairot-de-Fontenay et al., 2019). Toutes les altérations évoquées peuvent être la conséquence d'une faiblesse ou d'un manque d'activation du quadriceps, entraînant une décharge de l'articulation avec un risque à long terme pour les ménisques et cartilages mais aussi au niveau controlatéral du fait de la surcharge compensatoire (Pairot-de-Fontenay et al., 2023 ; 2019 ; Perraton et al., 2018).

1.2.3. Épidémiologie de la rupture du LCA

Les ruptures du LCA sont des lésions très fréquentes qui surviennent surtout chez le patient jeune et sportif (Rodriguez et al., 2021). En effet, le sport est un grand pourvoyeur de ruptures du ligament croisé antérieur. La fréquence des ruptures du LCA dépend du type d'activité sportive et du niveau d'activité puisque les athlètes de haut-niveau sont plus atteints que les athlètes amateurs (van Melick et al., 2016 ; *Haute Autorité de Santé - LARS, ligament artificiel du genou*, 2012). Aux États-Unis, il est estimé que 250 000 nouvelles ruptures du LCA se produisent chaque année, ce qui fait de la reconstruction du LCA l'une des procédures chirurgicales les plus courantes en médecine sportive (Claes et al., 2011). Cette blessure est considérée comme l'une des plus graves liées à l'activité physique en termes de vécu des patients et de coûts de santé (Kaeding et al., 2017 ; Kaur et al., 2016 ; Mather et al., 2013). De plus, la prévalence de cette rupture et de la reconstruction qui y est associée est en augmentation (Potts et al., 2022). La rupture du LCA peut aussi être associée à des atteintes concomitantes de structures du genou du fait de la relation anatomique étroite entre l'ensemble des éléments. Ces atteintes peuvent entraîner une rééducation limitée et plus longue, comme dans le cas des ménisques, avec une possible limitation de mise en charge et d'amplitudes (Erickson et al., 2019 ; Sherman et al., 2020).

1.2.4. Mécanismes de rupture et les types opératoires

Il existe différents mécanismes de rupture du LCA. Une grande partie des ruptures du LCA, notamment dans les sports collectifs, interviennent sans contact, lors de changements de direction, avec un genou bloqué en flexion, avec un valgus et une rotation externe (Tamalet & Rochcongar., 2016 ; Weinhandl et al., 2013). L'hyper-extension (ou shoot dans le vide) peut aussi être un mécanisme de rupture du LCA. Les mouvements imprévus avec changements de direction rapide ou mouvement brusque et non maîtrisé de l'articulation sont souvent en cause car ils imposent une charge élevée sur le LCA (Weinhandl et al., 2013).

Des facteurs de risque favorisent la rupture du ligament. C'est le cas notamment du sexe féminin, de la pratique du sport à haut niveau ou de la non maîtrise technique d'une activité sportive exigeante. Il existe aussi plusieurs prédispositions anatomiques osseuses et/ou ligamentaires ainsi que des phénomènes musculaires tels que la faiblesse du quadriceps ou des ischio-jambiers ou bien leur fatigue excessive (Tamalet & Rochcongar., 2016).

Après une rupture, le choix d'une reconstruction chirurgicale du ligament ou non pour le patient est crucial et ce sujet fait débat depuis de nombreuses années dans la littérature. Au cours des dernières années, la prise en charge conservatrice après une blessure au ligament croisé antérieur a gagné en popularité et la chirurgie peut ne pas toujours être recommandée (Filbay et al., 2023 ; Forelli, Riera, et al., 2023 ; Jenkins et al., 2022 ; Krause et al., 2018 ; Waldron et al., 2022). Cependant, ce type de prise en charge conservatrice n'est pas idéal pour tous les patients et la reconstruction reste l'option la plus fréquemment envisagée (Pauzenberger et al., 2013 ; Tamalet & Rochcongar., 2016).

Un rapport de la Haute Autorité de Santé rapporte que « *La rupture du ligament croisé antérieur, [...] ne cicatrise pas spontanément. Elle s'accompagne fréquemment d'une instabilité fonctionnelle avec des dérobements, une gêne à la pratique du sport, et ce d'autant plus que le patient est jeune, pratique un sport de pivot, présente un ressaut franc.* » Ainsi, la reconstruction semble être une solution viable dans le cas d'un patient jeune et sportif ou présentant une instabilité (*Haute Autorité de Santé - LARS, ligament artificiel du genou, 2012*). La revue de Dahduli et al. (2023) a montré que la reconstruction précoce du LCA favorisait une amélioration significative de la fonction subjective et de la stabilité.

Ainsi, malgré des données contradictoires, la reconstruction précoce, dans les 3 mois suivant la blessure, semble être l'option la plus intéressante pour des personnes avec un haut niveau d'activité, une activité compétitive ou de pivot ou avec des lésions associées/instabilités (Krause et al., 2018 ; Rodriguez et al., 2021).

Le type de greffon et la méthode d'intervention utilisés pour la reconstruction sont également des sujets assez largement évoqués dans la littérature, sans consensus. Il existe plusieurs méthodes opératoires impliquant différents greffons. Une étude de Malige et al. (2022) a évalué le fait que les résultats biomécaniques in-vitro étaient identiques en termes de contraintes et de résistance pour 9 sources de greffons différentes.

Dans notre étude, nous ne sélectionnerons que les 3 types de greffes les plus fréquentes : DIDT (semi tendineux et gracile), BPTB (tendon patellaire) mais aussi le TQ (tendon quadricipital) qui a démontré des résultats fonctionnels significativement similaires aux 2 autres greffons (Mouarbes et al., 2019). Chaque type d'intervention présente ses avantages et ses inconvénients. En *Annexe 4, Annexe 3 et Annexe 5*, nous présentons deux tableaux issus de l'étude de Tscholl et al. (2017) mettant en lumière les avantages/inconvénients de chacun des 3 greffons, ainsi qu'un complément avec l'étude de Mouarbes et al. (2019).

Dans la recherche permanente d'amélioration des interventions, l'importance du ligament antérolatéral (LAL) a émergé. Cette structure prend naissance au niveau de l'épicondyle latéral du genou puis à des insertions entre le tubercule de Gerdy et la tête fibulaire (Sonnerly-Cottet et al., 2016 ; 2015). Il assiste le LCA dans le contrôle rotatoire du genou. Cette reconstruction combinée (LCA + LAL) a démontré une réduction significative des taux de rupture du greffon LCA et une amélioration des taux de retour au sport par rapport à la reconstruction isolée du LCA (Saithna et al., 2018 ; Sonnerly-Cottet et al., 2017). De plus, l'ajout d'une plastie antérolatérale ne retarde pas la récupération fonctionnelle ou la préparation psychologique au retour au sport à 6 mois postopératoire par rapport à une reconstruction classique (Coquard et al., 2022).

1.2.5. Complications et déficits fréquents post-opératoires

Les lésions du LCA entraînent une variété importante de complications que ce soit à court ou à plus long terme. Nous retrouverons des déficits proprioceptifs comme évoqué précédemment. A plus long terme, des problématiques majeures comme le risque de récurrence ou la présence de pathologies méniscales et cartilagineuses peuvent être favorisées par la reconstruction du LCA (Curran et al., 2020 ; Kaur et al., 2016 ; Tamalet & Rochcongar., 2016).

D'un point de vue global, après une blessure comme la rupture du LCA, une inactivité et un déconditionnement sont fréquents. Il y aura une diminution de la VO₂ Max (consommation maximale d'oxygène lors d'un effort) dès 10 jours d'arrêt de l'entraînement et du volume d'éjection systolique dès 5 jours. Des dégradations musculaires sont aussi fréquentes avec

une diminution de la longueur fasciculaire et une augmentation de l'angle de pennation. L'impact psychologique est aussi fréquent et majeur (Coyle et al., 1984).

Comme nous l'avons vu précédemment, l'aspect fonctionnel est aussi impacté avec une instabilité antérieure–postérieure et rotatoire induisant divers mouvements adaptatifs et des modifications cinématiques lors d'activités fonctionnelles (Takeda et al., 2014).

L'impact majeur de cette rupture, suivie d'une reconstruction, sera sur la structure musculaire environnante. D'un point de vue morphologique, une étude a mis en avant le fait que plusieurs modifications intervenaient dans le vaste latéral du quadriceps après déchirure du LCA. Nous pourrions retrouver une atrophie ciblée surtout sur les fibres de type 2A, une diminution des cellules satellites et une diminution de la section transversale du muscle (Noehren et al., 2016). La masse musculaire squelettique est principalement définie par l'équilibre entre deux processus : dégradation et synthèse protéique. Le manque de mise en charge peut amener à un ratio en faveur de la dégradation de protéines. De même, les marqueurs inflammatoires, abondants après une blessure ou une chirurgie sont corrélés aux phénomènes atrophiques (Nunes et al., 2022). Ces éléments mettent en lumière l'importance d'agir rapidement en rééducation pour pouvoir limiter ces modifications biologiques. Nous avons récemment montré que l'abondance des cellules musculaires satellites diminue après une déchirure du LCA, tandis que la proportion de collagène augmente. Tout ceci associé à une apoptose et une dénervation des fibres musculaires plus importantes entraîne une faiblesse majeure du quadriceps qui peut persister plusieurs mois du fait d'une diminution de la capacité de régénération du muscle (Fry et al., 2017).

C'est ainsi que le phénomène d'AMI (Arthrogenic Muscle Inhibition) peut apparaître. Ce dernier consiste en un manque d'activation du quadriceps, surtout du vaste médial, du fait d'une inhibition centrale, de l'épanchement et de la douleur (Buckthorpe et al., 2024 ; Thomas et al., 2016). Elle est souvent associée à une hyperactivité des ischio-jambiers entraînant un flexum du genou. Différents grades existent pour cette pathologie et sont présentés en *Annexe 6*. Les preuves actuelles sur la prise en charge prônent l'utilisation associée de cryothérapie et d'exercices de relâchement et d'activation du quadriceps (Sonnery-Cottet et al., 2019).

Ces troubles sont persistants car cette faiblesse du quadriceps, qui est fréquemment observée dans la rééducation du LCA, peut être présente dès la première semaine post-opératoire, mais aussi à plus long terme (Charles et al., 2020 ; Solie et al., 2023). Un déficit de force au moins égal à 30% a été constaté à 6 mois post-opératoire, soit le moment où de nombreux patients retournent à la participation dans plusieurs activités. Ce déficit de force côté atteint est même retrouvé jusqu'à 2 ans après la reconstruction, avec un pic de faiblesse défini autour de 4 mois

après la reconstruction, soit le moment du retour à la course (RTR) (Grapar Žargi et al., 2017). Nous allons voir qu'un déficit supérieur à 30% en termes de force du quadriceps par rapport au côté opposé est un critère clinique ne permettant pas le RTR.

En résumé, la faiblesse du quadriceps est fréquente et peut entraîner des limitations telles qu'un déficit d'extension, des troubles de la marche, une atrophie, un déficit de fonction, de l'instabilité, des douleurs persistantes, de la kinésiophobie, un faible taux de retour au sport ou encore de l'arthrose précoce (Erickson et al., 2019 ; Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Sonnery-Cottet et al., 2019). Un déficit des IJ est aussi fréquent (Colapietro et al., 2023).

1.2.6. Principes de cicatrisation

Les tendons et les ligaments sont composés de tissu conjonctif dense. Leur composition précise et la disposition des macromolécules matricielles, cependant, diffèrent clairement pour fournir les propriétés mécaniques spécifiques requises par chaque structure pour fonctionner efficacement avec ses propres contraintes (Claes et al., 2011).

Le processus de cicatrisation, lors de la reconstruction du LCA, est favorisé par le fait que les structures des tissus mous, ligaments et tendons subissent des changements spécifiques dans leurs propriétés mécaniques et biologiques, lorsqu'elles sont exposées à une charge mécanique et à un environnement biologique différent (Scheffler et al., 2008).

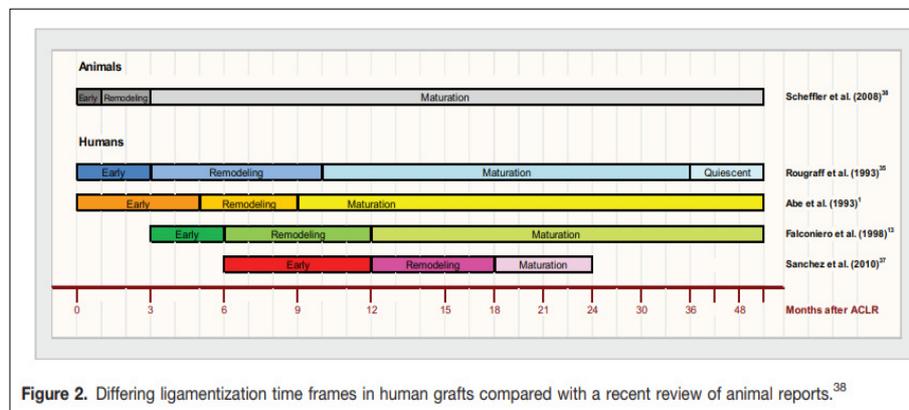


Figure 2 - Les différentes phases du processus de cicatrisation du LCA.

Cette *figure 2* issue de la revue de Claes et al. (2011) nous permet d'observer que le processus de cicatrisation est complexe et encore incompris. Malgré tout, nous remarquons qu'il existe 3 phases principales dans le processus. Des changements dans la constitution du greffon peuvent intervenir jusqu'à au moins 2 ans après l'opération. Cependant, le néo-ligament présenterait une composition semblable à celle du ligament initial dès 12 mois.

Les étapes de la cicatrisation du greffon peuvent être séparées en 3 phases, dans l'ordre chronologique : précoce, remodelage et maturation. Un continuum de changements biologiques va se mettre en place permettant au greffon de devenir mature et de présenter une composition proche d'un LCA natif (Pauzenberger et al., 2013). Dans les premières semaines, la résistance mécanique du greffon est faible et continue à décroître jusqu'à au moins 6 semaines (Scheffler et al., 2008). Il y aura une forte activité cellulaire et des changements dans la matrice extracellulaire. Dès 4 semaines post-opératoires, une néo-vascularisation du greffon est observée favorisant ainsi sa cicatrisation. Les propriétés mécaniques du greffon (résistance) sont inversement proportionnelles à l'activité cellulaire et au remodelage. Ainsi, c'est au cours de cette phase, avec un pic vers 2 mois, que les propriétés mécaniques du greffon sont les plus faibles (Scheffler et al., 2008).

Avant d'aborder les principes de rééducation après la reconstruction du LCA, il est important de rappeler que le greffon sera fragile entre 6 et 12 semaines et pourrait se rompre sous un étirement ou une charge excessive (Perriman et al., 2018). Un mouvement excessif pendant cette période peut nuire à la guérison mais une charge contrôlée est bénéfique.

1.2.7. Principes de rééducation classique

Bien qu'il s'agisse peut-être du sujet de réhabilitation le plus étudié, il n'y a pas de consensus sur la meilleure façon de réhabiliter un patient après la reconstruction du ligament croisé antérieur (ACLR). Il est bien établi que les résultats après ACLR ne sont pas parfaits (Buckthorpe & Della Villa, 2020).

La Haute Autorité de Santé a présenté en 2008 des recommandations sur la prise en charge de cette pathologie (*Critères de suivi en rééducation et d'orientation en ambulatoire ou en soins de suite ou de réadaptation après ligamentoplastie du croisé antérieur du genou*, 2008). De même, un grand nombre de revues et d'articles existent et présentent les recommandations en fonction des différentes phases de rééducation (Andrade et al., 2020 ; Culvenor et al., 2022 ; Kilgas et al., 2019 ; Kotsifaki et al., 2023). Nous allons dans cette partie essayer de présenter les grandes idées communes de chaque phase de rééducation.

Tout d'abord, la rééducation préopératoire est à prendre en considération car plusieurs études ont montré son intérêt sur divers critères fonctionnels et psychologiques (Culvenor et al., 2022 ; Giesche et al., 2020 ; Jenkins et al., 2022 ; Martini et al., 2022). De même, la force du quadriceps préopératoire est un prédicteur important de la fonction du genou en postopératoire (Brinlee et al., 2022). Ceci est retrouvé jusqu'à 2 ans post-reconstruction (Eitzen et al., 2010 ; Giesche et al., 2020). Dans cette phase, nous rechercherons la diminution

de la douleur et de l'épanchement, la restauration progressive des amplitudes articulaires, une reprogrammation neuromusculaire et l'éducation thérapeutique sur le post-opératoire (Andrade et al., 2020). L'objectif étant de disposer d'un genou sec, avec une bonne extension et activation complète du quadriceps pour l'opération (Culvenor et al., 2022).

Ensuite, la phase aigüe est très importante. La rééducation post-opératoire est précoce et se base sur la diminution des douleurs, la prévention des troubles trophiques et circulatoires, le travail des amplitudes articulaires notamment l'extension. L'objectif principal sera aussi l'obtention d'un verrouillage actif du genou pour envisager une mise en charge sécuritaire du membre. Le port d'une attelle de genou n'apporte aucun bénéfice en termes de laxité et de fonction du genou et devrait ainsi être proscrite (Culvenor et al., 2022). Les outils de physiothérapie que sont la cryothérapie, l'électrostimulation ou encore le Blood Flow Restriction (BFR) constituent des alternatives intéressantes à la rééducation classique en permettant de lutter contre l'épanchement, l'atrophie et d'optimiser le renforcement. Dans les 2 premières semaines de rééducation, les exercices de contraction isométriques du quadriceps et d'élévation jambe tendue sont intéressants et efficaces (Kotsifaki et al., 2023).

Par la suite, lorsque les complications post-opératoires auront été traitées, la phase intermédiaire pourra débuter avec comme objectif la stabilité du genou par le biais d'un renforcement musculaire et d'un travail proprioceptif et neuromusculaire. La recherche d'amplitudes articulaires et d'index de force musculaire similaires au côté sain sera primordiale. Le travail cardiovasculaire sera aussi à réintégrer tout comme le travail du membre sain (Buckthorpe et al., 2024). Les recommandations actuelles pour le renforcement musculaire afin de stimuler l'hypertrophie musculaire sont l'entraînement en résistance entre 60 et 80% de la 1RM (charge maximale que le patient est capable de soulever une seule fois), 2 à 3 fois par semaine sur 8 semaines (American College of Sports Medicine, 2009 ; Kilgas et al., 2019 ; Schoenfeld et al., 2021). Or, ces charges sont trop élevées pour pouvoir être utilisées de façon précoce en post-opératoire. Notons que les charges sont encore plus élevées pour la recherche de force musculaire. Tous ces éléments rendent le renforcement musculaire précoce difficile à mettre en place de façon efficace dans cette rééducation.

On notera également que lorsque l'exercice excentrique est ajouté à la rééducation standard du LCA, nous constatons de plus grandes améliorations du volume musculaire, de la section transversale et de la force (Curran et al., 2020 ; Stojanovic et al., 2023). L'intégration de cette modalité d'exercice est intéressante et aussi nécessaire dans l'objectif d'un RTR (retour à la course) pour préparer la musculature du genou aux contraintes frénatrices qu'elle devra supporter lors du RTR.

A présent, abordons l'utilisation de la CCO (Chaîne Cinétique Ouverte). Les recommandations générales consistent souvent à implanter la CCO uniquement à partir du 4^{ème} mois de rééducation voir plus tard. Cependant, la littérature récente prouve que l'implantation précoce de la CCO serait non dangereuse et efficace. Une revue de littérature de Perriman et al. (2018) et un article de Forelli, Barbar, et al. (2023a) permettent d'objectiver le fait que la littérature à ce sujet est variable. Malgré tout, nous notons que des preuves de faible qualité montrent que l'intégration précoce de la CCO n'entraînerait pas de différence dans la laxité, la force musculaire ou encore les tests fonctionnels par rapport à un groupe contrôle sans CCO précoce (Kotsifaki et al., 2023). Des articles procurent de faibles preuves que l'intégration précoce de CCO permet une amélioration de la symétrie musculaire des quadriceps et des ischio-jambiers à 3 et 6 mois et pourrait donc faciliter le RTR et le retour au sport (RTP) (Forelli, Barbar, et al., 2023a ; Forelli, Barbar, et al., 2023b ; Forelli et al., 2022).

On note aussi qu'il existerait une zone de sécurité pour le LCA lors de la pratique d'exercice en CCO. En effet, il n'y aurait aucune tension sur le ligament dans le secteur 90 – 60° de flexion de genou (Perriman et al., 2018). Sans charge associée, les exercices en CCO ne présentent aucun risque tandis qu'avec de la charge, il y a un étirement plus important sur le LCA qui nécessite une progression dans l'amplitude de flexion de genou utilisé pour respecter le temps de cicatrisation (Wang et al., 2023). Ainsi, ces preuves sont de faibles qualités mais permettent une nouvelle perspective de prise en charge de rééducation du LCA (Buckthorpe et al., 2024). Cette intégration précoce nous semble plus intéressante puisqu'elle permet un développement de force ciblé. Leur intégration plus tard dans la rééducation semble moins opportune puisqu'on se rapproche du fonctionnel et donc les exercices en CCO semblent moins adaptés à ce moment-là. L'association de ces deux types d'exercice dans la rééducation semble être la meilleure solution. Cependant, il faut rappeler qu'en tant que thérapeute nous restons soumis aux consignes chirurgicales.

En résumé, une rééducation précoce et accélérée est nécessaire avec un travail d'activation musculaire et une mise en charge rapide mais contrôlée (Feyzioglu et al., 2020 ; Waldron et al., 2022). L'optimisation des phases précoces pourrait permettre de faciliter l'atteinte de meilleurs critères fonctionnels (Buckthorpe & Della Villa., 2020). Les différentes étapes du processus de rééducation devront être évaluées par le biais de critères temporels mais aussi et surtout par des critères cliniques (Kotsifaki et al., 2023). De l'Annexe 7 à l'Annexe 12, plusieurs graphiques issus de différentes références sont présents pour étayer nos propos.

1.3. Continuum du Retour au Sport (RTP)

1.3.1. Théorie du continuum et intérêt du RTP

La blessure du LCA implique une longue rééducation comme nous l'avons évoqué. L'objectif de nombreux patients est de pouvoir retrouver leur niveau d'activité pré-blessure. Ainsi, différentes étapes constituent un long continuum vers le RTP comme le démontre la *figure 3* ci-dessous issue de Rambaud et al. (2022).

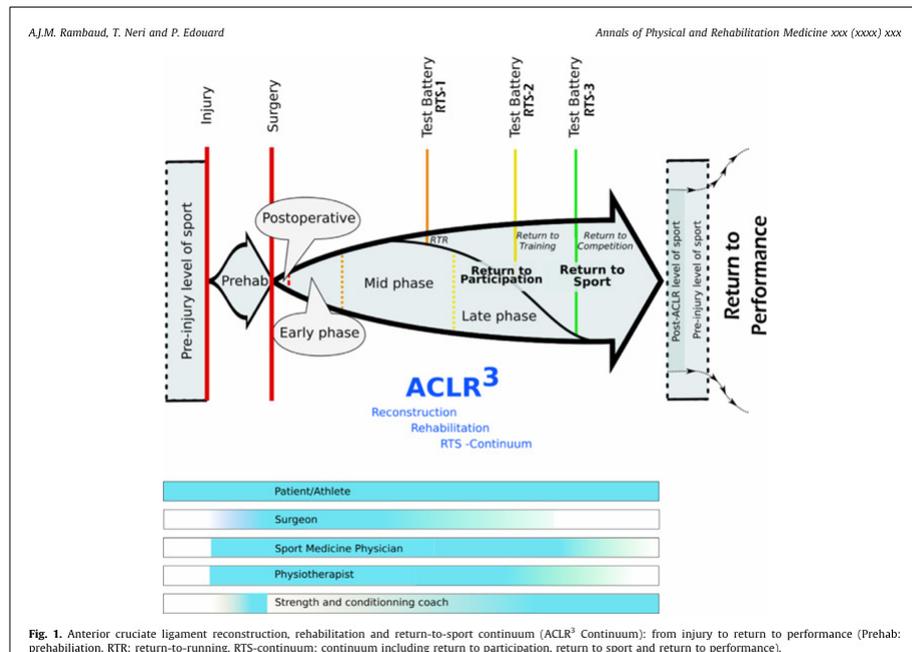


Figure 3 - Illustration des phases du continuum de RTP

Le RTR est souvent reconnu comme la première étape importante dans ce processus et constitue ainsi une étape majeure (Pairot de Fontenay et al., 2022). Ce retour est le plus souvent initié en utilisant un critère temporel de 12 semaines post-opératoire (A. J. M. Rambaud et al., 2018 ; Pairot de Fontenay et al., 2023). Cependant, un RTR peut commencer dès 6 à 8 semaines après la chirurgie, tandis que le temps nécessaire à un RTP sans restriction varie généralement entre 6 et 12 mois après la reconstruction du LCA (Pairot-de-Fontenay et al., 2019). Les critères temporels sont souvent utilisés afin de décider ou non du RTR, mais de plus en plus de critères objectifs voient le jour dans cette décision (A. J. M. Rambaud et al., 2018 ; Kotsifaki et al., 2023). De même, le risque de re-rupture du LCA diminue avec un RTP retardé (supérieur à 9 mois) et une validation des critères physiques et psychologiques spécifiques de reprise (Brinlee et al., 2022).

A long terme, l'objectif lors de la course sera de performer sans altérations biomécaniques. A court terme nous chercherons surtout une course qui ne déclenche pas une exacerbation des symptômes douloureux et inflammatoires (Pairot de Fontenay et al., 2022).

Au moment du RTR, différents paramètres peuvent être des prédicteurs pour évaluer si ce retour est possible. L'évaluation de la force musculaire (quadriceps et ischio-jambiers) et notamment l'index de symétrie avec la jambe saine est un élément important à cette étape du processus (A. J. M. Rambaud et al., 2018 ; Grondin et al., 2022). En effet, Dauty et al. (2022) ont proposé une symétrie d'au moins 60% pour le quadriceps et au moins 90% pour les ischio-jambiers afin de retourner à la course en sécurité.

Le score IKDC (International Knee Documentation Committee) qui reflète l'évaluation subjective de la fonction du genou par le patient est aussi un prédicteur significatif de la réussite du RTR à partir d'un score supérieur à 64/100 (Pairot de Fontenay et al., 2022).

La réussite du retour à la course peut ainsi être prédite par plusieurs critères physiques. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte une approche globale et surtout psychologique dans cette phase de reprise de course (Grondin et al., 2022 ; Pairot de Fontenay et al., 2022). Sadeqi et al. (2018) rapportent que le score ACL-RSI est meilleur à 4 mois chez les patients réussissant leur RTR. C'est aussi un prédicteur important du RTP à plus long terme (Zarzycki et al., 2021). Malgré cela, Pairot de Fontenay et al. (2022) ont montré que le score ACL-RSI n'était pas significativement prédicteur de réussite du RTR.

Deux études ont dévoilé qu'une forte corrélation existe entre le score ACL-RSI et le score subjectif IKDC (coefficient de corrélation Pearson à 0.59). Ceci est intéressant étant donné que ces deux éléments pourraient être des facteurs explicatifs d'un échec du processus de RTP. Cependant, la direction de cette relation n'a pas encore été établie. Nous ne savons donc pas si l'amélioration de la fonction auto-déclarée favorise la préparation psychologique ou si c'est plutôt l'inverse (Sadeqi et al., 2018 ; Zarzycki et al., 2021).

1.3.2. Chiffres du RTP

Sadeqi et al. (2018) ont mis en lumière le fait que 91 % des patients devant subir une reconstruction du LCA s'attendent à reprendre le sport au même niveau qu'avant la blessure, avec des restrictions minimales ou nulles, au moins un an après la chirurgie.

Dans deux revues de littérature, les auteurs ont montré que 82% des patients, après reconstruction du LCA, étaient retournés à une activité sportive. Cependant, seulement 63% étaient revenus à leur niveau pré-blessure et 44% à une pratique compétitive (Arden, Taylor, et al., 2014 ; Arden et al., 2011). Ainsi, ces chiffres montrent que la reconstruction du LCA a

un impact important sur la pratique sportive et que des progrès sont encore à faire dans le cadre de cette rééducation (Ardern et al., 2016). De même, près d'1/4 des patients ayant bénéficié d'une reconstruction du LCA auraient une seconde rupture (Culvenor et al., 2022).

Ces chiffres permettent de mettre en lumière une défaillance dans ce processus de RTP avec des résultats très loin des attentes. Il paraît ainsi cohérent de s'intéresser aux premières phases de ce processus afin de les optimiser et ainsi permettre, par la suite, une meilleure fonction précoce impactant positivement ces résultats de RTP.

1.3.3. Explication théorique de ces chiffres

Il a été prouvé que les athlètes qui sont retournés au sport avaient une fonction auto-déclarée du genou (score IKDC) et des indices de symétrie de force entre les membres plus élevés, mais aussi un score ACL-RSI plus important (score >56) (Ardern et al., 2013). Nous avons vu que moins de 50% des patients retournent à la compétition après reconstruction du LCA. Pourtant, les tests de fonction du genou, qu'ils soient subjectifs ou objectifs, montrent que près de 90% des patients ont obtenu une fonction de genou optimale après la rééducation. Ainsi, ces éléments mettent en lumière le fait que des facteurs autres que physiques peuvent avoir une influence sur le RTP (Ardern, Österberg, et al., 2014 ; Ardern et al., 2011 ; Christino et al., 2016 ; Jenkins et al., 2022 ; Webster et al., 2018).

Les réactions d'un patient à la chirurgie, ses croyances ou encore toute la sphère précoce de la rééducation fonctionnelle auraient un impact sur le RTP, d'où l'intérêt d'une rééducation précoce la plus optimisée possible. En effet, la reprise précoce d'activité comme la marche et la course ou encore la fonction précoce mais aussi la diminution de la douleur sont des prédicteurs d'un RTP réussi (Ardern et al., 2016).

Les principales raisons de ne pas reprendre le sport étaient le manque de confiance dans le genou (28 %), la crainte d'une nouvelle blessure (24 %) et une mauvaise fonction du genou (22 %) (Ardern, Österberg, et al., 2014 ; Webster et al., 2018). Ces éléments suggèrent qu'une amélioration de la fonction auto-déclarée du genou (score IKDC) permettrait au patient de faciliter son RTP, tout comme l'amélioration globale de la confiance en son genou. En *Annexe 13*, un graphique issu d'une étude présente la sphère bio-psycho-sociale autour du retour au sport (Jenkins et al., 2022).

1.4. Blood Flow Restriction (BFR)

1.4.1. Histoire du BFR

Cette méthode d'entraînement est née au Japon en 1966 avec le docteur Yoshiaki Sato. L'entraînement avec restriction de flux sanguin appelée « KAATSU » a été imaginé au cours d'une situation de vie quotidienne. Alors qu'il assistait à une messe bouddhiste, en position assise dans la posture traditionnelle japonaise ("seiza"), le docteur Sato a ressenti un engourdissement et un inconfort dans sa jambe qui ressemblait à celui qu'il ressentait lors de ses entraînements. Il a attribué cette sensation à la diminution du débit sanguin lié à sa position et a démarré ses recherches sur l'entraînement en restriction de flux sanguin (Sato, 2005).

Après plusieurs années d'expérimentation, sur lui-même notamment, il a trouvé une pression d'occlusion suffisante pour avoir des adaptations tout en restant sécuritaire et sa méthode a pu être généralisée au grand public en 1983 puis breveté en 1994 (Sato, 2005).

Le matériel KAATSU a été utilisé par l'équipe olympique d'hiver des États-Unis en 2014, par l'armée américaine ou encore les athlètes aux Jeux olympiques de Rio 2016. Il s'est étendu à 49 pays d'Europe, d'Amérique du Nord, du Sud, d'Asie et des grimpeurs du mont Everest ou des nageurs de la Manche l'utilisent (Accueil KAATSU France).

1.4.2. Mécanismes du BFR (principes, mécanismes, modalités d'application)

1.4.2.1. Principes

Le principe du BFR consiste en l'application d'un brassard, au plus près de la racine du membre (supérieur ou inférieur) afin de réaliser une occlusion partielle de l'afflux artériel et complète du retour veineux (Bielitzki et al., 2021 ; Patterson et al., 2019). Les adaptations musculaires sont obtenues en associant un stress mécanique et un stress métabolique. L'idée principale est d'induire, par pressurisation, un stress métabolique permettant d'obtenir des adaptations musculaires sans avoir besoin d'un stress mécanique important. Dans l'entraînement classique, c'est le stress mécanique qui va créer un stress métabolique. Ici, un stress métabolique sera mis en place et un petit stress mécanique supplémentaire sera ajouté. L'utilisation du BFR se révèle particulièrement bénéfique pour les personnes âgées ou les personnes qui se remettent d'une blessure, car cela peut faciliter les améliorations de la force musculaire, de l'endurance et de la capacité fonctionnelle sans imposer un stress ou une charge excessive aux articulations ou au système cardiovasculaire (Scott et al., 2023).

1.4.2.2. Mécanismes

Les mécanismes physiologiques précis qui se déroulent lors de l'application du BFR sont encore mal compris et incomplètement connus (Bielitzki et al., 2021 ; Scott et al., 2023). Malgré tout diverses hypothèses explicatives existent.

On sait que la compression du système vasculaire proximal du muscle squelettique entraîne un apport insuffisant d'oxygène (hypoxie) dans le tissu musculaire. La diminution du débit sanguin veineux entraîne une accumulation de sang à l'intérieur des capillaires des membres occlus (Patterson et al., 2019). Il y a aussi le fait que l'hypoxie remet en question le métabolisme énergétique local. En effet, elle réduit le temps nécessaire pour atteindre l'échec volontaire pendant l'entraînement aérobie et l'entraînement en résistance par rapport à un exercice similaire sans restriction (Rolnick & Schoenfeld. 2020). La fatigue s'accumule en raison du stress métabolique, la vitesse de contraction musculaire ralentit et l'activation musculaire augmente, ce qui stimule en fin de compte les processus anaboliques.

Une autre explication serait que l'hypoxie créée entraîne une augmentation de la production de lactate, elle-même responsable d'une cascade métabolique. Cette cascade de réaction à l'occlusion va activer les Interleukines-6 qui faciliteront l'activation du complexe mTORc1 qui joue un rôle dans la synthèse de protéines. Ces mécanismes physiologiques vont agir directement sur les cellules satellites en permettant leur activation, leur différenciation et leur prolifération. Le BFR serait donc un « *accélérateur biophysologique naturel* » qui va induire une cascade de réactions métaboliques permettant d'atteindre un gain en force et en hypertrophie (Planque & Tamalet. 2021).

L'entraînement par résistance à faible charge avec BFR entraîne une accumulation accrue de métabolites. Selon la théorie, ceci induit des processus anaboliques en agissant sur d'autres facteurs, notamment des augmentations des hormones systémiques, un recrutement des fibres musculaires à contraction rapide, une diminution de l'expression de la myostatine et un gonflement des cellules. Ces facteurs peuvent activer d'autres cascades de signaux complexes qui conduisent à une augmentation de la biosynthèse des protéines mais aussi de la prolifération et de l'activité des cellules satellites (Bielitzki et al., 2021 ; Bowman et al., 2019).

Rappelons que la faiblesse et l'atrophie des quadriceps après reconstruction du LCA sont associées à une diminution de la fréquence et du recrutement des fibres à contraction rapide ainsi qu'à une augmentation de l'expression de la myostatine et une diminution de cellules satellites (Curran et al., 2020). Ainsi, le BFR présenterait une solution intéressante pour lutter contre l'atrophie musculaire après reconstruction du LCA.

1.4.2.3. Modalités d'Application

Une étude de Scott et al. (2023) et une revue de Patterson et al. (2019) ont effectué un panorama des méthodes d'utilisation du BFR dans la littérature actuelle.

Ce dernier est principalement utilisé en association avec les exercices à faible charge (20 – 40% 1RM). Les volumes d'exercice sont modérés avec l'utilisation de 4 séries de 30/15/15/15 répétitions. Ceci permet de provoquer une fatigue musculaire lors de la première série puis de travailler avec cette fatigue lors des séries suivantes. Les périodes de repos sont courtes (30 à 60s) et la pression d'occlusion appliquée varie de 40 à 80% de la LOP (Limb Occlusion Pressure), soit la pression nécessaire à l'occlusion de la circulation artérielle totale. Ce schéma de répétition (30/15/15/15) est courant dans la littérature sur le BFR (Loenneke et al., 2016 ; 2012) et doubler le volume ne semble pas augmenter les adaptations (Martín-Hernandez et al., 2013). Des adaptations musculaires peuvent être retrouvées aussitôt qu'après une à trois semaines d'exercices à faible intensité sous BFR. Toutefois, il est recommandé de réaliser 2 sessions de BFR par jour si le cycle d'entraînement est inférieur à 3 semaines, alors que c'est seulement 2 à 3 fois par semaine lorsque le cycle est supérieur à 3 semaines.

Il est aussi utilisé avec des charges élevées chez les athlètes notamment où certaines études montrent une amélioration des performances. Des études de qualité seront nécessaires pour valider ces résultats. Son association avec des charges plus élevées sera à mettre en place dès que les restrictions de charge liées à une pathologie ne sont plus présentes. En effet, cela permettra de réintroduire des charges mécaniques plus importantes sur les structures du système musculo-squelettique et de stimuler d'autres adaptations importantes au cours de la rééducation de la LCA comme la résistance des tendons (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019).

Une autre application du BFR dans la littérature est en lien avec l'exercice aérobique, et ce avec des intensités faibles, inférieures à 50% de la fréquence cardiaque de réserve ou de la VO2 Max. Malgré tout, les modalités d'application du BFR avec ce type d'exercice restent mal définies et variables dans la littérature, ce qui rend la généralisation des résultats difficile (Scott et al., 2023). Enfin, l'application passive du BFR seule ou associée à de la stimulation électrique a aussi fait ses preuves et ce, sur des cycles de 5 minutes d'occlusion, répétés 3 à 4 fois avec 3 minutes de re-perfusion entre (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019).

Quel que soit la modalité d'exercice associée, la pression appliquée entre 40 et 80% de la LOP semble être efficace et sûre (Bielitzki et al., 2021 ; Patterson et al., 2019). Avant un programme d'entraînement avec BFR, il est important qu'il y ait une sensibilisation du patient en lui expliquant ce qu'il va se passer et ce qu'il va ressentir (Planque & Tamalet. 2021).

1.4.3. Ce qui a été prouvé

1.4.3.1. *Hypertrophie et Force Musculaire*

L'entraînement avec BFR associé à des exercices de faible charge provoque des adaptations musculaires (hypertrophie et force) similaires à celles qui pourraient être obtenue avec un renforcement à charge élevé (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Scott et al., 2023).

Le BFR améliore de préférence la section transversale des fibres musculaires et augmente l'abondance des cellules satellites chez les patients en bonne santé (Erickson et al., 2019). Ces adaptations ont même été prouvées sur des délais très courts. En effet, une étude de cas clinique d'Abe et al. (2005) a démontré qu'un protocole d'entraînement avec BFR de deux fois par jour sur deux semaines permettait une hypertrophie, une amélioration de la section transversale et de la force en extension. Ainsi, comme évoqué dans deux revues de littérature, un protocole de rééducation précoce avec BFR est efficace pour lutter contre les phénomènes atrophiques post-opératoires (Charles et al., 2020 ; Wengle et al., 2022). Une étude de Bowman et al. (2019) a montré que le renforcement musculaire avec BFR permet une hypertrophie des groupes musculaires situés à la fois en proximal et en distal du garrot.

Enfin, une revue de littérature de Hughes et al. (2017) a classé les différents modes d'exercice existants en termes d'efficacité sur l'hypertrophie et la masse musculaire. L'exercice à faible charge avec BFR avait de meilleurs résultats que l'entraînement à faible charge seul mais de moins bon résultats que l'entraînement à haute charge. Ainsi, l'exercice avec BFR constitue une alternative lorsque l'application de charges élevées est impossible.

1.4.3.2. *Douleur*

Dans un essai contrôlé randomisé de Hughes, Rosenblatt, et al. (2019), les auteurs ont montré que 8 semaines d'entraînement avec BFR associé à de faibles charges avaient permis une diminution significative de la douleur articulaire par rapport à un entraînement traditionnel à charges élevées. En revanche, la douleur musculaire ressentie était plus élevée au sein du groupe BFR au cours des exercices réalisés, même si ces derniers étaient à faibles charges (Hughes, Patterson, et al., 2019 ; Hughes et al., 2018 ; 2017). Ceci serait dû à l'accumulation de métabolites mais aussi à l'environnement hypoxique (Hughes et al., 2018). Plusieurs études ont montré que l'application du BFR pourrait abaisser les seuils de la douleur et ainsi avoir un effet hypo-algésique (Scott et al., 2023). En effet, la réalisation d'exercice avec faibles charges et BFR permettrait une sensation douloureuse moindre pendant l'effort mais aussi 24h après par rapport à un exercice classique à charge élevé (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019).

1.4.3.3. Capacité Cardio-Vasculaire

Il existe des preuves modérées démontrant que le BFR associé à l'exercice aérobique peut procurer des bienfaits cardiovasculaires et musculaires à des populations allant de jeunes athlètes en bonne santé à des adultes plus âgés (Scott et al., 2023), le tout à une intensité modérée (40% VO₂ Max ou 30% Fréquence Cardiaque de Réserve). L'entraînement avec BFR permettrait ainsi une amélioration de l'endurance et de la capacité cardio vasculaire mais aussi du temps avant épuisement (Bennett & Slattery. 2019 ; Corvino et al., 2014). Une intensité aussi faible que celle associée à la marche combinée au BFR permet des améliorations significatives de la force et de l'hypertrophie musculaire (Abe et al., 2010). De même, un travail de faible intensité (40% de VO₂max) sur cycloergomètre, de courte durée (15 min) avec BFR, permet des adaptations musculaires significatives (circonférence et section transversale) et une amélioration de la VO₂ Max (Abe et al., 2010 ; Silva et al., 2019).

1.4.3.4. Autre

Le BFR permettrait aussi d'améliorer la formation osseuse, une hypertrophie tendineuse, la capacité fonctionnelle et la fonction subjective tout en agissant aussi dans la lutte contre l'épanchement (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Okoroha et al, 2023 ; Scott et al., 2023). Son utilisation peut ainsi être généralisée à plusieurs pathologies comme l'obésité, l'arthrose, la sarcopénie, les méniscectomies ou même à d'autres populations comme les sportifs en associant l'exercice de charges élevées et de charges faibles avec BFR afin de bénéficier de l'environnement hypoxique unique créé par cette restriction (Ke et al., 2022 ; Rolnick & Schoenfeld., 2020 ; Scott et al., 2016 ; Wortman et al., 2021). L'exercice de résistance à faible charge avec BFR favorise une réponse métabolique et une fatigue accrue, ainsi qu'une activité myo-électrique plus prononcée que l'exercice à faible charge seul traditionnel, mais pas autant que l'exercice à charge élevée. Cette activité myo-électrique est plus importante avec des pressions élevées (80% LOP) qu'avec des pressions modérées (40% LOP) (de Queiros et al., 2021 ; Rolnick & Schoenfeld., 2020).

On note aussi qu'il semblerait que les pressions élevées appliquées (60-80% LOP) permettraient d'avoir un RPE (sensation d'effort perçu) similaire entre les groupes malgré le fait que l'un utilise des charges faibles et l'autre des charges plus élevées (Hughes, Patterson, et al., 2019). Malgré tous ces éléments, il est important de préciser que la littérature sur le BFR, notamment sur ses conditions d'utilisation et d'application, est encore incomplète et contradictoire. Plusieurs articles ont même démontré que le BFR ne permettait pas d'amélioration significative sur plusieurs facteurs comme les perceptions subjectives du patient (score IKDC), mais aussi sur la force, l'hypertrophie musculaire, la douleur ou encore

sur les tests fonctionnels (Curran et al., 2020 ; Cuyul-Vásquez et al., 2020 ; Iversen et al., 2016). Plus récemment, une revue de littérature de Colapietro et al. (2023) a démontré qu'il n'existait pas de différence cliniquement significative entre la thérapie conventionnelle et le BFR sur la force et l'hypertrophie après ACLR. Ceci est probablement dû à un manque d'étude de qualité importante et à une grande variation des protocoles d'application du BFR.

1.4.4. Types de matériels et le système MadUp®

Au cours de notre étude, nous utiliserons l'outil d'occlusion automatique Mad-Up®, technologie brevetée d'une marque française. L'ensemble est composé d'un appareil avec un écran pour les réglages et l'aspect biofeedback visuel des contractions, mais aussi des câbles étanches reliés à des manchons compressifs avec différentes tailles possibles (Normatech Medical, 2023). Une présentation de l'affichage de l'outil est disponible en *Annexe 14*. L'intérêt majeur des appareils récents comme celui de Mad-Up® ou des tourniquets de Delfi® est la présence de capteurs qui permettent le calibrage et l'ajustement permanent de la pression d'occlusion au cours de l'exercice, malgré les variations de tension durant les mouvements (Planque & Tamalet. 2021). Il est favorable d'utiliser des systèmes automatiques comme la méthode MadUp® qui permettent un calcul fréquent de la pression d'occlusion nécessaire et surtout une pression appliquée propre à chaque patient. Ceci garantit un stimulus sûr et efficace aux patients pour obtenir des résultats optimaux (Wengle et al., 2022).

1.4.5. Sécurité et BFR

La littérature actuelle montre que l'entraînement avec occlusion est un entraînement relativement sûr (Clark et al., 2011 ; Loenneke et al., 2011). Malgré tout, des événements indésirables peuvent survenir lorsque le BFR est appliqué de manière inappropriée. Nous avons également peu d'informations sur l'impact à long terme de l'utilisation de cette restriction de flux sanguin lors des exercices (Nascimento et al., 2022). Une grande étude menée auprès de 100 fournisseurs de soins au Japon incluant environ 13000 patients ayant utilisés l'entraînement avec BFR, a montré qu'il y avait un taux de satisfaction de 80%. Peu d'évènements indésirables ont été recensés. Parmi eux, on pouvait retrouver : hémorragie sous-cutanée (13,1 %), engourdissement (1,297 %), anémie cérébrale (0,277 %), sensation de froid (0,127 %), thrombus veineux (0,055 %), embolie pulmonaire (0,008 %), rhabdomyolyse (0,008 %) (Bowman et al., 2019 ; Nakajima et al., 2006). Notons qu'un muscle peut se retrouver en hypoxie sévère à partir du moment où la compression dure plus de 30 min (Clark et al., 2011). Ainsi, la compression devra être de courte durée avant une phase de re-perfusion suffisante d'au moins 3 minutes (Australian Sports Commission, 2021).

Ainsi, diverses contre-indications existent par rapport à l'utilisation du BFR : les troubles cardiaques ou vasculaires, les antécédents de thrombose veineuse profonde, l'hypertension artérielle, les infections, l'insuffisance veineuse ou encore le fait d'être enceinte (risque possible de choc homéostatique) (Nascimento et al., 2022 ; Patterson et al., 2019). Bien que l'utilisation du BFR soit très répandue dans la littérature, il est important de se rappeler que le risque de thrombose veineuse profonde est multiplié par 100 dans les 6 premières semaines post-opératoires. Ainsi, l'interrogatoire et la surveillance de signes cliniques indésirables, même au cours de l'exercice avec BFR sera à réaliser (Nascimento et al., 2022).

1.5. Problématique de notre étude

1.5.1. Raisonnement

La rééducation qui suit l'ACLR et le processus de continuum du RTP ne sont pas optimaux car les taux de RTP à une pratique compétitive sont faibles. Plusieurs études ont montré l'intérêt des phases précoces de rééducation sur les critères cliniques du patient à long terme, qu'ils soient physiques ou psychologiques. Ainsi, chercher à optimiser l'efficacité de ces phases précoces semble primordial. Or, il est impossible dans ces phases de respecter les recommandations de charge nécessaires pour permettre les adaptations musculaires. C'est pourquoi, l'utilisation du BFR semble intéressante. En effet, il permet de stimuler des adaptations musculaires, de diminuer la douleur et de lutter contre les effets liés au déconditionnement sans appliquer de charges excessives. Ceci pourrait ainsi permettre d'optimiser la réalisation de la première étape fonctionnelle majeure du continuum de RTP qu'est le RTR. Le BFR semble avoir les caractéristiques nécessaires pour optimiser une grande partie des critères susceptibles de prédire la réussite du RTR. C'est ce que nous allons essayer d'observer dans cette étude, mais aussi si le BFR peut avoir un effet positif sur la réalisation pratique d'un programme de réintroduction de course. A notre connaissance, il n'existe aucune étude s'intéressant à ce sujet dans la littérature, hormis un mémoire similaire au nôtre (Jaffredo, 2020). Nous rédigeons ainsi un protocole d'essai contrôlé randomisé.

1.5.2. Problématique

Dans quelle mesure l'utilisation du Blood Flow Restriction permet-elle d'optimiser les critères physiques et psychologiques des patients lors du retour à la course dans un contexte de rééducation post-opératoire du LCA ?

Proposition d'un protocole pour un essai contrôlé randomisé

2. METHODE

2.1. Justification théorique du protocole

Les ruptures du LCA sont fréquentes et touchent principalement les patients jeunes et sportifs (Rodriguez et al., 2021 ; Van Melick et al., 2016). Malgré une absence de consensus sur le sujet, la reconstruction chirurgicale du LCA reste l'option la plus fréquemment envisagée (Pauzenberg et al., 2013 ; Tamalet et Rochcongar, 2016). Une rééducation longue et complexe démarre à la suite de l'opération (Kostifaki et al., 2023) avec l'objectif de reprendre le sport au niveau antérieur (A. J. Rambaud et al., 2022 ; Sadeqi et al., 2018). Pourtant, les taux de retour au sport ne sont pas satisfaisants avec moins de 50% des patients qui retournent à un niveau de pratique compétitive (Arden et al., 2014). Ces chiffres permettent de mettre en lumière une défaillance dans ce processus de RTP avec des résultats très loin des attentes. Il semble ainsi opportun de s'interroger sur les premières phases de ce processus, comme la reprise de course, afin de les optimiser et ainsi permettre une meilleure fonction précoce qui pourrait impacter positivement les résultats de RTP par la suite.

Les charges appliquées sur les articulations du genou sont importantes et augmentent avec l'exigence de l'exercice réalisé (Hassebrock et al., 2020). La rupture du LCA entraîne des modifications cinétiques et des asymétries qui peuvent être néfastes à long terme (Pairot de Fontenay et al., 2023 ; Takeda et al., 2014). Ces modifications peuvent persister plusieurs années et le temps seul ne restaure pas les déficits (Knurr et al., 2021).

Le système musculaire a une très grande importance lors de la course et est lié aux altérations biomécaniques en cas de faiblesse (Pairot de Fontenay et al., 2019). Cette faiblesse, notamment du quadriceps, est fréquente après l'opération du fait de l'immobilisation et du phénomène d'AMI qui entraînent une atrophie et un déficit d'activation musculaire pouvant persister à long terme puisque des déficits de force de 30% par rapport au côté sain ont été retrouvés à 6 mois post-opératoire (Buckthorpe et al., 2024 ; Nunes et al., 2022). Il est ainsi essentiel d'agir de façon précoce sur ses déficits musculaires pour limiter l'atrophie et restaurer une fonction optimale rapidement. Malgré tout, durant les phases précoces, le genou reste inflammatoire et la cicatrisation du néo-greffon est en cours avec un pic de faiblesse mécanique vers 2 mois (Scheffler et al., 2008). Ainsi, il est impossible de mettre en place les recommandations de l'ACSM (2009) pour l'exercice en hypertrophie/force car les charges appliquées (70-80% 1RM) sont trop importantes pour un genou réactif et à risque.

C'est ainsi que le BFR trouve son intérêt. Cette méthode d'exercice associée à la restriction de flux sanguin a démontré un impact positif sur les adaptations musculaires (hypertrophie et force), la douleur, les capacités cardio-vasculaires, les performances physiques. Pourtant, le BFR est associé à des charges faibles (20-40% 1RM) qui sont plus supportables pour des patients dans les phases précoces de rééducation (Scott et al., 2023). L'utilisation du BFR dans les phases précoces de la rééducation du LCA pourrait permettre une limitation des déficits de force pouvant se répercuter à des périodes clés de la rééducation, notamment au moment de la reprise de la course. En effet, la reprise de la course est une étape importante du processus de reprise du sport et constitue un objectif majeur qui se déroule généralement à 12 semaines. Différents critères sont évoqués dans la littérature pour savoir si la reprise de la course est possible pour les patients (A. J. M. Rambaud et al., 2018). Cependant, un critère a été reconnu comme étant un prédicteur du retour à la course réussi : le score IKDC > à 64/100 (Pairot de Fontenay et al., 2022).

On notera que plusieurs étapes du processus de RTP, et notamment le retour au sport compétitif en lui-même, sont aussi limitées par des critères psychologiques (manque de confiance dans le genou, peur de la récurrence) (Webster et al., 2018). Ces facteurs psychologiques sont aussi prédicteurs de la réussite ou non du RTP (Ardern et al., 2013). De plus, une étude de Zarzycki et al. (2021) a dévoilé qu'une corrélation existe entre les scores de préparation psychologique (ACL-RSI) et les scores de fonction subjective (score IKDC) sans que la direction de cette relation ne soit clairement définie.

Dans cette étude nous souhaitons observer l'impact de l'utilisation du BFR, dans la rééducation précoce post-LCA, sur la validation de critères objectifs et subjectifs en lien avec le processus de RTP. La littérature est variée au sujet de l'impact du BFR sur le score IKDC avec deux études validant son impact et une étude concluant qu'il n'y avait aucun effet.

En résumé, nous mettons en place une rééducation précoce et intensive après la reconstruction chirurgicale du LCA associée à l'application du BFR sous différentes formes. Nous observerons l'impact de cette intervention sur le score IKDC au moment de la reprise de course mais aussi l'impact sur d'autres critères, à la fois physiques et psychologiques. Enfin, la réalisation pratique d'une réintroduction de course sera effectuée afin de vérifier si une corrélation entre les critères et la réalisation pratique existe.

2.2. Présentation générale du protocole

Nous allons, à présent, exposer le protocole que nous proposons afin de répondre à la problématique évoquée précédemment.

2.2.1. Objectifs

L'objectif principal de notre protocole est d'observer dans quelle mesure la rééducation post-opératoire du LCA associée à une utilisation précoce, intense et variée du BFR peut optimiser l'atteinte des critères autorisant le retour à la course des patients après ACLR.

En objectifs secondaires, nos résultats pourraient permettre de constater si, au-delà de l'atteinte des critères, l'application du BFR dans la rééducation précoce pourrait améliorer la réalisation pratique d'un programme de RTR. Nous cherchons aussi à savoir si l'utilisation du BFR associé à une rééducation précoce et intense peut être une intervention efficace pour améliorer la préparation psychologique des participants à la reprise d'activité.

2.2.2. Hypothèses

- La rééducation avec BFR permet de valider un plus grand nombre de critères susceptibles de favoriser la reprise de la course par rapport à une rééducation standard.
- La réussite d'un programme de réintroduction de la course en autonomie est favorisée par la rééducation post-opératoire avec BFR.
- Les patients ayant eu une rééducation avec BFR auront moins d'appréhension psychologique et une meilleure confiance en leur genou au moment de reprendre la course (des scores ACL-RSI et IKDC plus importants).

2.2.3. Design et Recrutement

Notre étude est un essai contrôlé randomisé, multicentrique qui se déroulera sur une période de 16 semaines, de la phase post-opératoire précoce jusqu'au moment du retour à la course. Cette étude sera en simple aveugle. En effet, les investigateurs ne connaîtront pas l'attribution au groupe des participants évalués. Les participants et les thérapeutes ne seront pas en aveugle.

Le recrutement des participants se réalisera en partenariat avec des centres orthopédiques lors des séances préopératoire. Les patients recevront une information claire et loyale sur l'étude et l'utilisation du Blood Flow Restriction. Le consentement écrit des patients sera récolté (notice d'information et formulaire de consentement en *Annexe 15 et Annexe 16*).

Après avoir été informé du déroulement de l'étude par un investigateur et avoir donné leur consentement écrit, les patients seront questionnés afin de vérifier les critères d'inclusion, de non-inclusion et d'exclusion. Par la suite, s'ils sont inclus, ils seront randomisés au sein d'un des deux groupes de notre étude :

- Groupe BFR post-opératoire
- Groupe contrôle avec rééducation post-opératoire classique.

La randomisation des patients sera dite stratifiée et sera réalisée sur le logiciel Excel. La réalisation d'une rééducation préopératoire ou non sera le critère utilisé pour la stratification afin d'harmoniser les groupes.

Comme évoqué précédemment, les patients seront pris en charge par des masseurs-kinésithérapeutes libéraux avec comme base de rééducation le protocole-type que nous allons présenter. Ils réaliseront les évaluations prévues, à 14 semaines, avec des investigateurs qui ne connaîtront pas le groupe attribué à chaque patient. La reprise de course se déroule généralement à 12 semaines post-opératoires dans la littérature (Van Cant et al, 2022). Nous avons choisi d'ajouter 2 semaines à cette moyenne. Tout d'abord, afin d'avoir un plus long temps d'exercice sous BFR. Puis, afin de disposer du plus de participants possibles atteignant les critères de reprise afin d'avoir plusieurs participants durant la réalisation du programme de réintroduction de course, même si ce dernier n'a qu'une visée exploratoire dans notre étude.

Le protocole proposé devra démarrer dans les deux premières semaines post-opératoires. Une étude de Łyp et al. (2018) a mis en lumière l'importance d'un début précoce de la rééducation afin d'optimiser les résultats fonctionnels à long terme.

Au cours des 14 semaines, l'application du BFR se fera en l'associant à différents types d'exercice (en résistance et en aérobie, avec des charges et intensités évolutives). Le but étant d'optimiser la reprise de la marche lors des 4 premières semaines puis de préparer le retour à la course sur les 10 semaines suivantes.

Les données démographiques de chaque patient (âge, indice de masse corporelle, antécédents, activité sportive et niveau...) seront enregistrées en préopératoire dans un tableau présent en *Annexe 17* afin d'observer si des associations peuvent exister entre ces paramètres et les résultats obtenus par les patients, mais aussi dans le but de comparer l'homogénéité des groupes randomisés et d'établir les caractéristiques générales de nos échantillons de population. Les patients se verront attribuer un code lors de leur randomisation qui permettra de préserver l'anonymat des données récoltées.

2.2.4. Critères d'inclusion

- Patients entre 18 et 40 ans. Au-delà, nous pourrions avoir des différences de cicatrisation entre les individus plus marquées. La rupture du LCA étant une blessure courante, des critères réduits devraient tout de même nous permettre de disposer d'un échantillon acceptable.
- Rupture et reconstruction du LCA en unilatéral avec méthode BPTB ou Kenneth Jones (tendon patellaire) / DIDT (gracile et demi-tendineux) / TQ (tendon quadricipital)
- Etre en capacité de démarrer la rééducation dans les deux semaines après l'opération. En effet, plus le temps entre l'opération et le début de la rééducation est long, plus la fonction du genou à long terme est mauvaise (Łyp et al., 2018).
- Temps entre rupture du LCA et intervention chirurgicale inférieur ou égal à 6 mois. Nous préférons une intervention chirurgicale rapide post-blessure puisque Ardern et al. (2013) ont montré qu'un délai important entre la blessure et la reconstruction favorise les troubles psychologiques au moment du RTP.
- Pratiquer une activité sportive fréquente à un niveau modéré. Score Tegner Activity Scale (TAS) entre 4 et 7 inclus.

Nous utilisons la Tegner Activity Scale (Ardern et al., 2014 ; Tegner & Lysholm, 1985) : Cette échelle évalue le niveau d'activité en fonction des exigences fonctionnelles du genou sur une échelle de 11 niveaux (score de 0 à 10). Ceci permet d'harmoniser le niveau de sport et de limiter des biais même si cela limitera aussi la généralisation des résultats. Il faut aussi noter que l'étude de Christino et al. (2016) rapporte que des athlètes de bon niveau (TAS > 7) retrouvent moins facilement leur niveau de sport pré-blessure étant donné que ce dernier est plus élevé et exigeant. En revanche, une étude de van Melick et al. (2016) rapporte qu'un niveau d'activité préopératoire de TAS plus élevé prédit un meilleur résultat fonctionnel à un suivi minimal de 22 mois. Cette échelle est à retrouver en *Annexe 18*.

Voici le *tableau I*, qui présente les critères d'inclusion de notre étude de façon graphique.

Tableau I - Critères d'inclusion à l'étude

Critères d'inclusion	
Age entre 18 et 40 ans	√
Rupture unilatérale LCA et reconstruction (BPTB/KJ – DIDT – TQ)	√
Début protocole < 1 semaine post-op	√
Temps entre rupture et opération < / = 4 mois	√
4 ≤ Score Tegner Activity ≤ 7	√

2.2.5. Critères d'exclusion

La présence de certains critères entraînerait l'exclusion de patients inclus dans l'étude :

- Ne termine pas l'étude / Rate plus de 6 séances sur l'ensemble du protocole
- Présence de complications post-opératoire majeures (infection, phlébite...)
- Evènements indésirables majeurs lors des séances de BFR

2.2.6. Critères de non inclusion

Si les critères d'inclusion ne sont pas respectés, les patients ne seront pas inclus dans l'étude. De même, comme évoqué précédemment, le BFR n'est pas sans risque. Ainsi, afin de garantir la sécurité des patients, plusieurs contre-indications à l'exercice avec BFR sont présentes dans nos critères de non inclusion. L'ensemble de ces éléments est basé sur les critères d'inclusion, sur le guide de l'Australian Sport Commission (2021) mais aussi sur toutes les contre-indications et risques liés au BFR évoqués dans l'introduction (Nascimento et al., 2022 ; Patterson et al., 2019).

- Score TAS < 4 ou > 7
- Age < 18 ans ou > 40 ans
- Démarre la rééducation plus de 2 semaines après l'opération
- Opération réalisée plus de 6 mois après la blessure
- Antécédents de rupture du LCA (récidive)
- Présence de lésions associées (LCP, ménisques, ligaments collatéraux,

fractures/luxations associées). Ces éléments nous permettent d'homogénéiser la population de l'étude et de limiter des biais liés au fait que les lésions associées peuvent entraîner des impacts sur la rééducation et la progression de la rééducation.

- Intervention chirurgicale avec une allogreffe. En effet, la rééducation suite à une allogreffe n'entraîne pas une phase de limitation / morbidité pour un site donneur ce qui pourrait accélérer certaines étapes et donc entraîner un biais dans les résultats obtenus (Rambaud et al., 2018, Tscholl et al., 2017). En revanche, le temps d'incorporation de la greffe est plus long et le taux de rupture semble plus élevé (Tscholl et al., 2017).

- Antécédents de thrombose veineuse profonde ou de pathologie vasculaire dans l'un des membres inférieurs, et l'utilisation de médicaments anticoagulants (Hugues et al., 2018). Antécédents de chirurgie vasculaire sur le membre concerné.

- Antécédents de pathologies cardiovasculaires graves
- Hypertension artérielle sévère et/ou Drépanocytose et/ou Syndrome des loges

2.2.7. Critères de précaution

Diverses études ont montré que certains critères ne sont pas des contre-indications absolues à l'utilisation du BFR mais plutôt relatives (Australian Sport Commission, 2021 ; Nascimento et al., 2022). Ainsi, une présence de ces derniers entraîne une précaution particulière pour les effets indésirables évoqués plus tôt. L'association de plusieurs de ces critères devient une contre-indication absolue à l'utilisation du BFR : diabète, grossesse ou pilules contraceptives, obésité, tabac et plaies sur le lieu d'application du BFR.

En *Annexe 19*, nous pouvons retrouver le questionnaire type d'inclusion que nous proposons. Il est inspiré de celui de Braga et al. (2023). Ce questionnaire est à remplir par le médecin / chirurgien du centre orthopédique en présence du patient puis sera à retourner à un investigateur de notre étude afin de décider de l'inclusion du participant. Pour l'analyse, de la question 1 à la question 16, une réponse contraire aux attendus des critères évoqués plus tôt sera considérée comme une non inclusion du patient. De la question 17 à la question 20, ce ne sont pas des contre-indications mais des précautions, ainsi l'inclusion sera remise en question seulement si au moins 2 critères sont associés.

2.2.8. Matériel utilisé

La technologie MadUp® sera utilisée au cours de notre protocole. Cet outil permet un calcul et un ajustement automatique de la pression d'occlusion appliquée. La pression d'occlusion artérielle (LOP) est la pression nécessaire pour interrompre la circulation sanguine dans un membre et constitue un point de référence pouvant être utilisé pour la prescription d'un entraînement BFR (Normatech Medical, 2023).

Pour mettre en place les manchons compressifs, nous nous placerons au plus proche de la racine du membre inférieur. Nous brancherons le câble sur le manchon en positionnant bien le capteur à la face antérieure de la cuisse pour faciliter/optimiser la prise de la pression au niveau de l'artère fémorale par ce capteur. Le calibrage de la pression d'occlusion se fait par la machine, avant la série, en décubitus dorsal (Planque & Tamalet, 2021). Le calcul de la pression d'occlusion automatiquement par la machine a montré une efficacité similaire à celle du gold standard qu'est l'utilisation du doppler (Abbas et al, 2022).

On notera aussi qu'un feedback est présent sur l'écran de la machine MadUp® avec une courbe d'intensité de la contraction, ce qui peut être utile notamment au début de rééducation, dans la première phase, avec la lutte contre l'AMI dans laquelle le feedback visuel peut s'avérer opportun (Draper et Ballard, 1991 ; Norozian et al., 2023).

Même si les informations sur le sujet sont peu nombreuses et de faible qualité, nous retiendrons que l'application du BFR en continu doit être limitée à moins de 20 minutes pour les membres inférieurs, avant de laisser un temps suffisant pour la reperfusion des tissus (3 minutes), d'où le temps de repos qui sera administré entre nos exercices au cours du protocole (Australian Sport Commission, 2021).

2.2.9. Critères d'arrêt d'une séance de BFR lors de l'intervention

Plusieurs critères seront à surveiller et pourraient entraîner l'arrêt des séances d'exercices avec BFR comme un RPE > à 9 lors de l'un des exercices réalisés. Il a en effet été prouvé que l'application du BFR lors des exercices provoque un RPE plus important que sans BFR. Ainsi, même si les charges sont moins importantes, il faut rester dans des conditions d'exercices acceptables pour les patients (Nascimento et al., 2022). D'autres éléments sont à considérer comme l'apparition de paresthésies temporaires, des ecchymoses ou des douleurs musculaires (Braga et al. 2023). C'est aussi le cas de l'appréhension, la douleur et/ou l'épanchement qui peuvent être des signes de dépassement de la capacité actuelle de l'athlète, justifiant une modification de sa charge de travail actuelle (Brinlee et al. 2022). Des signes généraux comme la pâleur, la cyanose, des vomissements, nausées ou une sensation de malaise général sont des signes d'alerte. Enfin la demande d'arrêt du sujet sera le critère d'arrêt principal de toute séance d'exercice sous occlusion.

2.2.10. Résumé de l'étude et Timeline

Le protocole de rééducation démarrera au cours des deux premières semaines post-opératoire et durera 14 semaines. Ce protocole sera composé de 4 grandes phases. Les patients au sein des deux groupes réaliseront exactement les mêmes exercices, la seule différence résidant dans l'application du BFR qui ne sera pas présente dans le groupe contrôle.

La première phase de rééducation, au cours des 4 premières semaines, aura pour objectif de retrouver une marche fonctionnelle, une extension de genou complète et une activation correcte du quadriceps mais aussi de réduire la douleur et l'œdème.

La seconde phase de rééducation, de la 5^e à la 9^e semaine, aura pour objectif de remettre en place une activité physique aérobie avec des exercices de marche et de vélo afin de travailler sur l'endurance musculaire et cardiovasculaire. L'autre objectif de cette phase sera le début du renforcement hypertrophique avec de faibles charges.

La troisième phase du protocole se déroulera de la 10^e à la 14^e semaine. L'objectif sera de limiter les déficits de force et de fonction entre les deux membres. Le renforcement en force et en hypertrophie du quadriceps et de la chaîne postérieure sera complet et évolutif.

Ensuite, à 14 semaines, les critères de reprise de la course seront évalués, ainsi que le score ACL-RSI. Pour les patients jugés aptes à reprendre la course, un programme de réintroduction de la course de deux semaines à effectuer en autonomie sera fourni. Ils devront compléter ce programme en respectant les séances et leur durée. Les séances de course seront réalisées avec un appareil connecté (montre/smartphone) pour récolter les données de course. Enfin, à 16 semaines, les patients auront une nouvelle évaluation où les données de course mais aussi leurs ressentis et les possibles évènements indésirables seront récoltés.

Un total de 64 sessions d'exercices avec BFR seront réalisées au cours des 14 semaines, Une comparaison précise sera réalisée dans la partie discussion, mais dans un mémoire similaire sur le sujet, 25 séances étaient réalisées sur une période de 12 semaines, soit plus de 2 fois moins que dans notre protocole, ce qui montre l'aspect intensif de la rééducation proposé dans notre protocole (Jaffredo, 2020).

En *Annexe 20 et Annexe 21*, vous pouvez retrouver un graphique et un tableau présentant le contenu, l'ordre chronologique et la durée des différentes étapes au cours de chacune des 3 visites de notre protocole.

A présent, voici la *figure 4* qui est une timeline résumant le protocole. Il sera ensuite suivi d'une description détaillée de chaque phase du protocole avec des tableaux guides.

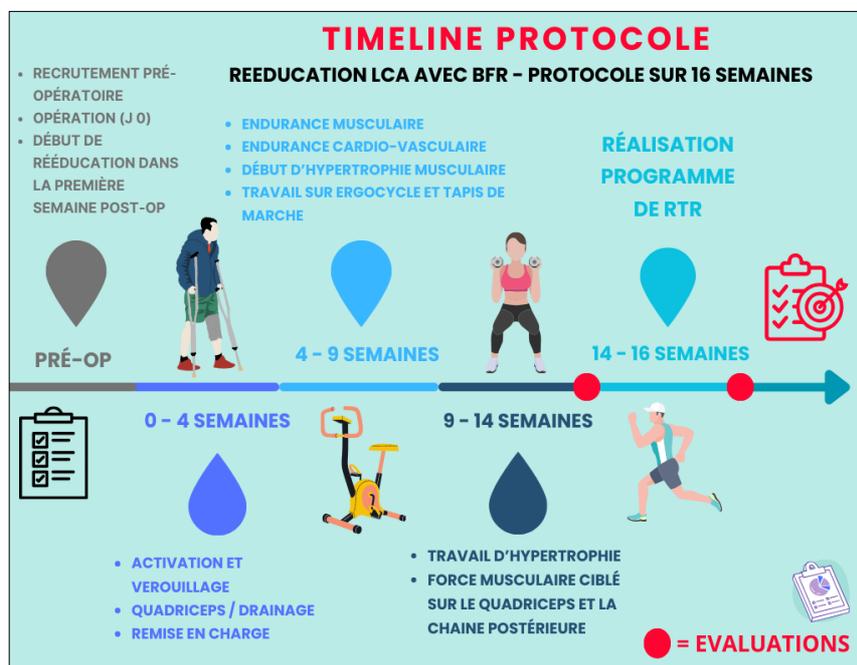


Figure 4 - Timeline des différentes phases du protocole et leurs objectifs

2.3. Critères de jugement

2.3.1. Principal

- Questionnaire IKDC (International Knee Documentation Committee) subjective knee form score. Ce questionnaire de 18 items permet de mesurer les symptômes perçus par le patient étant associés à la douleur, la raideur, l'épanchement, l'instabilité et la fonction du genou dans les activités de la vie quotidienne. Deux dimensions distinctes ont été identifiées au sein du questionnaire avec des items évaluant les symptômes et d'autres s'intéressant au niveau d'activité et de fonction. Le coefficient alpha de Cronbach varie de 0.87 à 0.92 selon les études. Cette échelle a prouvé sa validité et sa fiabilité (Higgins et al., 2007 ; Irrgang et al., 2001). La différence minimale cliniquement importante (MCID) varie selon les études mais Collins et al. (2011) ont montré qu'elle serait entre 11,5 à 20,5 chez ceux qui ont subi diverses interventions chirurgicales pour des pathologies variées du genou (entre 6 et 24 mois après ACLR).

Comme évoqué précédemment, il n'existe pas de batterie de test validée dans la littérature pour valider la reprise de la course post-LCA. En revanche, une étude de Pairot de Fontenay et al. (2022) a montré que le score IKDC, avec un seuil minimum établi à 63,7/100, était un critère significativement prédictif du retour à la course réussi. En effet, un participant avec un score supérieur à 64 avait 3 fois plus de chance de réussir son programme de RTR.

Ainsi, ce test sera notre critère de jugement principal. Nous chercherons à savoir si un plus grand nombre de patients dans le groupe BFR a atteint ce seuil de 64/100 dans le score IKDC. Ce score permettra ainsi d'évaluer si le patient est apte à reprendre la course mais nous apportera aussi des informations précieuses sur le seuil de perception subjective et de confiance du patient en son genou lors de diverses activités. Nous chercherons à observer s'il existe une corrélation entre le renforcement musculaire avec le BFR et une amélioration de la fonction subjective du genou lors de l'exercice.

2.3.2. Secondaires

- Validation des critères de la batterie de test de RTR proposée par Rambaud et al. (2018). Cette batterie de tests me paraît intéressante mais c'est une scoping review et il n'y a pas de validation scientifique et donc statistique, c'est pourquoi elle ne sera utilisée et analysée qu'en tant que critère de jugement secondaire. Elle permettra cependant d'évaluer, par le biais de plusieurs tests, si le patient est prêt physiquement à reprendre une activité aussi intense que la course.

- Score ACL-RSI pour évaluer la préparation psychologique et l'appréhension du patient au moment de reprendre l'activité après ACLR. Ce score est composé de 12 questions, chacune associées à une échelle de Likert de 0 à 11 points. Il comporte trois domaines : l'évaluation du risque, la confiance et les émotions. Le coefficient alpha de Cronbach était excellent (0.96). La version française a été évaluée comme étant fiable, valide et comparable à la version anglaise. Ce score a été corrélé à plusieurs autres échelles comme le score IKDC et est également prédictrice du RTP (Bohu et al., 2014 ; Webster et al., 2007). Calcul du score ACL-RSI : $(\text{Total Items} \times 100) / 120 = \dots$

- Retours et score post-réalisation (/30) d'un programme de RTR en autonomie. L'ensemble de ces critères de jugement nous permettra de répondre à nos différentes hypothèses de départ. En effet, nous aurons la possibilité de savoir si les critères de reprise de la course sont plus facilement atteints après une rééducation avec BFR ou non. Nous aurons aussi la possibilité de voir si la fonction subjective et la confiance en son genou du patient sont meilleures après une rééducation avec BFR ou non. Enfin, si des patients atteignent le programme de reprise de course, nous aurons la possibilité d'observer si une corrélation existe entre les critères de reprise de course, la préparation psychologique et la réussite de cette reprise de course sans exacerbation.

2.4. Protocole Type Proposé

Avant de commencer la présentation détaillée du protocole de rééducation type utilisé pour notre étude, abordons un point important. Le protocole est défini de façon précise avec des séances types en fonction des jours pour la reproductibilité. Malgré tout, il nous semble nécessaire de préciser que les masseurs-kinésithérapeutes prenant en charge les patients ont la possibilité, si l'état du patient (douleur, fatigue majeure...) le nécessite, de modifier/adapter une séance au besoin. Cependant, si des séances trop éloignées du protocole type sont fréquemment réalisées, le patient pourra être considéré comme sortant de l'étude.

De même, bien que ces éléments soient évalués à 14 semaines, l'épanchement et la douleur devront être considérés en permanence par les thérapeutes. En effet, ils permettent de voir le degré de réaction du genou aux contraintes qui lui sont imposés et ainsi de jauger si l'exercice proposé est toléré ou non par les tissus (Cooper & Hugues, 2019).

2.4.1. Première phase de rééducation (de la 1^{ère} à la 4^{ème} semaine)

L'objectif principal de cette phase est de reprendre l'appui et la marche. Plusieurs objectifs secondaires existent dans cette phase. C'est le cas de la lutte contre l'AMI et contre la présence d'un flexum, le travail d'activation du quadriceps (vaste médial), le relâchement des ischio-jambiers, le travail du schéma de marche avec le verrouillage actif, mais aussi la diminution de l'épanchement et de la douleur du patient.

Moyens utilisés : Epanchement et douleur : cryothérapie compressive, mobilisations de rotule et massage drainage. Pour l'AMI : contracté-relâché des ischio-jambiers pour réduire le flexum puis travail de contraction du quadriceps en élévation de rotule et lever de talon. Pour la marche : travail d'activation dynamique du quadriceps et de remise en charge progressive

Cette première phase est divisée en 2 sous-phases de 2 semaines, dont voici ci-dessous le détail respectif décrit en partie à l'écrit mais accompagné d'un tableau complet.

- Première partie de la phase (de 0 à 2 semaines) : 4 séances par semaine (8 au total)

Durant cette première phase, les deux groupes vont réaliser exactement les mêmes exercices (même durée, même nombre de répétitions...), le seul élément qui va varier est l'application du BFR (consignes dans la dernière colonne du tableau) lors des exercices d'activation du quadriceps pour le groupe BFR et pas dans le groupe contrôle.

Toutes les séances démarreront par 10 minutes de contracté-relâché / massage des ischio-jambiers afin de détendre et fatiguer ce groupe musculaire dans le but de limiter le flexum et de lutter contre le phénomène décrit dans l'introduction : Arthrogenic Muscle Inhibition et ses différents grades (*Annexe 6*) (Sonnerly-Cottet et al., 2019). Une mobilisation douce du genou sera aussi réalisée pour un gain d'amplitude progressif, dans le respect de la douleur.

Ensuite, 30 minutes seront réservées à des exercices d'activation musculaire du quadriceps, avec ou sans BFR. Ces exercices seront réalisés soit en contraction flash soit en maintien isométrique en fonction des séances. Quel que soit le groupe, ces exercices seront associés à l'application du NMES (Neuro Muscular Electrical Stimulation) au niveau du quadriceps avec un courant amyotrophie ou renforcement. Plusieurs études ont démontré l'intérêt de l'association de l'électrostimulation et du BFR dans le gain en force et en hypertrophie, même sur des courtes périodes (2 semaines) (Buckthorpe et al., 2024 ; Glatke et al., 2022 ; Head et al., 2021 ; Natsume et al., 2015 ; Santiago-Pescador et al., 2023 ; Slysz et al., 2018). Deux électrodes (une proximale et une distale) seront placées sur le vaste médial et sur le vaste latéral. Le vaste médial sera principalement ciblé de par son inhibition lors de l'AMI.

Les modalités d'application du BFR et les temps d'exercices et de repos sont présentés dans le *tableau II* ci-après.

Chaque séance se terminera par un massage drainant de la face antérieure du genou mais aussi par l'application de cryothérapie compressive qui a montré son intérêt par son effet antalgique (Glattke et al., 2022). Une étude de Yang et al. (2023) a comparé l'impact de l'application précoce de cryothérapie compressive après reconstruction du LCA par rapport aux poches de glace classiques. La cryothérapie compressive permet une diminution significativement meilleure de la douleur et de l'épanchement lors de la première semaine (avec un pic autour de 4 jours). Ainsi, l'application précoce de ce type de système permet de diminuer la douleur et l'épanchement chez les patients après l'opération par les effets accumulés de la vasoconstriction liée au froid et de la compression. Cette diminution de douleur et de l'œdème pourrait limiter le phénomène d'Arthrogenic Muscle Inhibition et ainsi, favoriser le retour à des activités fonctionnelles plus précoces.

Tableau II - Rééducation en phase aiguë (semaines 0 à 2)

	Durée Séance	Contenu Séance	Temps Exercice	Consignes de Réalisation	Application du BFR (groupe BFR)
Séance 1 et 3	1h	Contracté-Relâché IJ et Mobilisation	10 min	Elever la patella en contraction flash le plus de fois possible	MI atteint uniquement LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion calibrée à 80% en continu. Programme : Post-Opératoire Sous-programme : Anti-Atrophie
		Activation quadriceps Contraction Flash + NMES	30 min	1 série d'échauffement à vide (sans BFR)	
		Massage Drainage patella et Cryothérapie	20 min	3 séries de 5 min 3 min de repos entre	
Séance 2 et 4	1h	Contracté-Relâché IJ et Mobilisation	10 min	Lever le talon de la table avec maintien 3 secondes le plus de fois possible	MI atteint uniquement LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion calibrée à 80% en continu. Programme : Post-Opératoire Sous-programme : Anti-Atrophie
		Activation quadriceps en Endurance + NMES	30 min	1 série d'échauffement à vide (sans BFR)	
		Massage Drainage patella et Cryothérapie	20 min	3 séries de 5 min 3 min de repos entre	

- Deuxième partie de la phase (de 2 à 4 semaines) : 4 séances par semaine (8 au total)

Matériel nécessaire dans cette phase : table de massage, espaliers, élastiques (avec progression de la résistance des élastiques au cours des séances), une petite haie.

Les deux premières séances se réaliseront sur table avec des exercices d'élévation jambe tendue (EJT) ou de leg extension sans charge assis en bord de table en respectant un tempo.

Les 6 séances suivantes se feront debout, en charge, avec des exercices de verrouillage actif du quadriceps en charge. D'abord statique sans résistance, puis avec une résistance légère et enfin, lors d'exercices dynamiques de passage de pas et de marche avec le membre inférieur (MI) atteint. L'ensemble des détails sur cette phase sont présents dans le *tableau III*.

Tableau III - Rééducation en phase aiguë (semaines 2 à 4)

	<u>Durée Séance</u>	<u>Contenu</u>	<u>Temps Exercice</u>	<u>Consignes de Réalisation</u>	<u>Application BFR (groupe BFR)</u>
Séance 1 et 2	45 min	Verrouillage du quadriceps en EJT et Leg Extension	25 min	Verrouillage actif du genou en EJT assis et en Leg Extension sans charge 2/0/2/1 = 2s de montée puis 2s de descente, 1s en bas.	MI atteint LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion 80% en continu. Dépressurisé à la fin de chaque set. Programme Hypertrophie
		Cryothérapie – Drainage - Mobilisations	20 min	4 sets de 30/15/15/15 répétitions avec 30s de repos entre les séries 3 min entre les sets	
Séance 3 et 4	45 min	Verrouillage du quadriceps en charge	25 min	Verrouillage du genou en charge debout face à l'espalier ou avec béquilles. Extension du genou sans résistance en contraction flash avec appui. Protocole 30/15/15/15 . 30s de pause entre chaque série. 3 min entre les sets	MI atteint LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion 80% en continu. Dépressurisé à la fin de chaque set. Programme Hypertrophie
		Cryothérapie – Drainage - Mobilisations	20 min	3 sets à faire.	

	<u>Durée Séance</u>	<u>Contenu</u>	<u>Temps Exercice</u>	<u>Consignes de Réalisation</u>	<u>Application BFR (groupe BFR)</u>
Séance 5 et 6	45 min	Verrouillage du quadriceps en charge avec résistance	25 min	Verrouillage du genou en charge avec un élastique léger. 2/1/2/0 = 2s d'extension de genou, 1s de maintien, 2s de contrôle du retour. Protocole 30/15/15/15. 30s de pause entre chaque série. 3 min entre les sets. 3 sets à faire	MI atteint LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion 80% en continu. Dépressurisé à la fin de chaque set. Programme Hypertrophie
		Cryothérapie – Drainage – Début de Travail Cicatriciel	20 min		
Séance 7 et 8	1h	Réapprentissage de la marche :		Etapes 1° et 2° : protocole de 3 x 5 min sous occlusion avec 1m30 min de pause entre. Etape 2° : utilisation d'une haie pour enjamber avec le membre non atteint. Etape 3° : 20 min d'occlusion continue avec une marche sur tapis roulant à un rythme habituel/confortable pour le patient.	MI atteint LOP calculée automatiquement Pression d'occlusion 80% en continu. Dépressurisé à la fin de chaque étape Programme Hypertrophie
		1° Déroulé du pas et mise en charge unilatérale avec verrouillage	20 min		
		2° Passage du pas avec appui/verrouillage du MI atteint.	20 min		
		3° Mise en application sur tapis de marche	20 min		

2.4.2. Seconde phase de rééducation (de la 5^{ème} à la 9^{ème} semaine)

Les objectifs de cette façon sont :

- Améliorer l'endurance musculaire et cardio-vasculaire des patients
- Améliorer l'hypertrophie du quadriceps.

Dans cette seconde phase, deux méthodes de calcul de la charge d'entraînement seront utilisées en fonction des exercices :

- Nous utiliserons la fréquence cardiaque de réserve lors des exercices aérobiques : les informations utiles (FC maximale et FC Repos) seront calculées au début de chaque séance aérobique. Nous appliquerons une intensité cible d'entraînement de 40% et calculerons la FC cible de chaque patient individuellement : 40% de (220 - âge - FC Repos) C'est l'intensité qui est recommandée pour l'exercice aérobique (Rolnick et al., 2020b).

- Nous utiliserons aussi, dès cette phase et tout au long de l'étude, le système de calcul RPE (perception de la difficulté de l'exercice par le patient) proposé par Borg en 1982. Nous demandons aux participants d'évaluer leur effort sur l'échelle pendant l'activité, en tenant compte du stress physique et de la fatigue mais en négligeant tout facteur comme la douleur aux jambes ou l'essoufflement. Nous nous concentrons sur la sensation d'effort. Ce nombre indique l'intensité de l'activité permettant au participant d'accélérer ou de ralentir ses mouvements/activités. Bien qu'une méta-analyse de Chen et al. (2002) remette sa fiabilité en question, plusieurs études et une revue de littérature récente ont montré sa validité/fiabilité pour quantifier l'effort (Lamb et al., 1999 ; Morishita et al., 2018 ; Skinner et al., 1973). Vous retrouverez en *Annexe 22*, l'échelle utilisée pour quantifier l'effort à chaque set par le patient. Le patient réalise son 1^{er} set au poids fixé et adapte ensuite ce dernier en fonction du RPE.

A noter, en cas de difficultés avec l'application des RPE, il est aussi possible d'utiliser une approximation de la 1RM en calculant la 1RM controlatérale à 4 semaines. Ensuite, le travail sera réalisé à 30% de cette 1RM controlatérale pour le leg extension et pour la presse. L'évaluation du 1RM devra être faite dans le respect des recommandations.

Les patients auront 4 séances par semaine durant 5 semaines sur cette phase, soit un total de 25 séances. Comme lors du début du protocole, les patients réaliseront exactement les mêmes exercices, la seule différence sera l'application du BFR lors de ceux-ci dans le groupe BFR et pas dans le groupe contrôle.

Les séances 1 et 3 correspondent à un travail sur ergocycle en interval training à une intensité faible (40% de la FC de réserve). Ces exercices seront progressifs en termes de répétitions et seront réalisés avec une montre connectée permettant de calculer et de contrôler l'intensité de l'exercice par le biais du calcul de la FC.

Les séances 2 et 4 représentent le début du travail de renforcement musculaire à faible charge. 4 exercices différents seront mis en place afin de varier les stimuli et les groupes musculaires ciblés. Chaque exercice sera réalisé selon le protocole 30/15/15/15 répétitions avec 30s de répétitions entre chaque série. L'intensité de la charge sera calculée en

demandant au patient de quantifier sa perception de difficulté de l'exercice et en se plaçant à une intensité de 5/10 (ou 30% 1RM controlatérale).

Les exercices seront réalisés dans les amplitudes de genou disponibles pour chaque patient, sauf pour le leg extension en charge qui se fera entre 90-45° de flexion de genou dans cette phase afin de respecter une zone de sécurité pour le greffon. Ces amplitudes évolueront dans les phases suivantes et le respect de la douleur du patient sera primordial (Perriman et al., 2018 ; Wang et al., 2023).

Matériel nécessaire pour cette phase : Ergocycle, tapis de marche, outil de mesure de la FC (montre connectée), machines de presse, machines de leg extension, haltères.

Points de précisions sur le *tableau IV* qui suit :

*Il y a 5 semaines de travail dans cette phase. Nous commençons la 1^{ère} semaine avec 2 sets de 4 répétitions : 2 x (4 x (2'/1')). Chaque semaine, nous ajouterons une répétition. Pour atteindre lors de la 5^e semaine, 2 sets de 8 répétitions. 2 x (8 x (2'/1')).

Tableau IV - Rééducation en phase intermédiaire (semaines 5 à 10)

	Durée Séance	Contenu	Consignes	Application BFR	Programme MadUp®
Séance 1 et 3	1h	Echauffement Vélo	10 min d'échauffement sans résistance	Non Appliqué	Libre
		Interval Training sur Ergocycle avec BFR	2 sets composé chacun de : 4 à 8 répétitions* de 2' travail / 1' repos. 5 min de repos entre les 2 sets. L'intensité de l'exercice est fixée à 40% de la FC de réserve calculée de l'individu	MI atteint BFR en continu. Retiré lors de la pause entre les sets. 80% de la LOP.	
		Exercice de marche sur tapis roulant avec BFR	20 min de marche en continu avec BFR sur tapis roulant réglé à 4km/h ;	MI atteint BFR en continu. 80% de la LOP.	

	Durée Séance	Contenu	Consignes	Application BFR	Programme MadUp®
Séance 2 et 4	1h	Echauffement Vélo	10 min d'échauffement sans résistance	Non Appliqué	Hypertrophie
		Renforcement musculaire Avec BFR (groupe BFR) et sans (groupe contrôle)	Protocole de renforcement avec 1 set de 30/15/15/15 répétitions par exercice : - Fentes - Presse unilatérale - Pont fessier - Leg Extension unilatéral (90 — 45°) RPE 5 (ou 30% 1RM controlatéral) Amplitudes disponibles 30 s de repos entre les séries. 3 minutes de repos entre les exercices.	Pour le groupe BFR : MI atteint Occlusion continue, dépressurisé entre les exercices. Occlusion à 80% de la LOP.	

2.4.3. Troisième phase de rééducation (de la 10^e à la 14^e semaine)

Objectifs de cette phase : Au cours de cette phase, nous poursuivrons le travail visant l'hypertrophie et la force musculaire avant de pouvoir reprendre la course. Nous chercherons à minimiser les déficits de force par rapport à la jambe saine (score LSI – Limb Symetry Index).

On recherche l'hypertrophie et la force musculaire en s'approchant progressivement de charges de plus en plus élevées au cours de la phase de rééducation. Le travail en excentrique du quadriceps est aussi un préalable important à la reprise de la course et de sauts.

Bien entendu, le protocole proposé est strict et centré sur les éléments jugés prioritaires à la reprise précoce du genou. Cependant, certains éléments importants comme le renforcement des abdominaux, des fessiers et le travail proprioceptif ou encore des sauts pourront être ajoutés au cours des séances proposés par les thérapeutes en libéral.

Matériel nécessaire pour cette phase : Leg Extension / Presse Horizontale / Leg Curl / Step / Barre de poids et différents poids pour s'adapter au poids cible de chacun / élastiques

Deux séances par semaines seront consacrées au renforcement du quadriceps, tandis que deux séances seront orientées sur le renforcement de la chaîne postérieure. Quatre

exercices différents seront proposés pour chaque groupe musculaire avec 4 séries de répétitions progressives par exercice. Cette surcharge progressive est essentielle pour le recrutement maximal des fibres musculaires et leur hypertrophie (American College of Sports Medicine, 2009).

Pour cette phase, nous encourageons l'utilisation des RPE pour quantifier la charge de travail. Nous jugeons qu'au vu du nombre d'exercices proposés, le calcul du 1RM pour chacun serait contraignant. Malgré tout, dans les *tableaux V et VI* ci-dessous, nous proposons le RPE et le pourcentage de 1RM correspondant pour laisser la possibilité aux praticiens d'utiliser le 1RM s'il le souhaite sur certains exercices.

Sur chacun des exercices ci-dessous, un métronome sera à respecter : 2s de concentrique, 1s de maintien isométrique et 2s de contrôle excentrique. Cette utilisation multimodale des fibres a montré son intérêt dans le développement hypertrophique (American College of Sports Medicine, 2009).

➔ 4 séances par semaine sur 5 semaines pour cette phase (25 séances au total)

Tableau V - Rééducation en phase avancée (semaines 10 à 14)

	Durée	Contenu	Consignes	Application BFR
Séance 1 et 3	1h	Echauffement vélo 10 min	10 min d'échauffement libre cardio-vasculaire et musculaire sur vélo	Non Appliqué
		Renforcement du Quadriceps (squats, presse unilatérale, réceptions de fentes, leg extension unilatéral)	<p>4 séries par exercice en suivant les répétitions et les charges évolutives* 1m30s de repos entre les séries. 3 minutes de repos entre les exercices.</p> <p>Back Squats avec barre + poids Presse horizontale Travail en réception de fentes avec poids bras tendu au-dessus de la tête = contrôle excentrique du quadriceps. Leg extension entre 90-30° Tempo 2/1/2</p>	<p>MI atteint 80% LOP</p> <p>Il est appliqué durant toutes les séries, mais enlevé entre les exercices différents.</p> <p>Programme MadUp® Force</p>

	Durée	Contenu	Consignes	Application BFR
Séance 2 et 4	1h	Echauffement High Intensity Interval Training poids du corps sans occlusion	3 tours, 4 exercices : - Squats - Talons Fesses - Mountain Climblings - Montée de genoux 30s exercice/10s de repos.	Pas d'Occlusion lors du HIIT
		Renforcement des Ischios-Jambiers et Gastrocnémiens (Soulevé de terre, leg curl unilatéral, good morning, montée pointe de pied unilatérale)	4 séries par exercice en suivant les répétitions et les charges évolutives* 1m30s de repos entre les séries. 3 minutes de repos entre les exercices. Soulevé de terre avec barre + poids Leg Curl en procubitus Good morning avec barre et poids. Montée pointe de pied sur step avec poids Tempo 2/1/2	MI atteint 80% LOP Appliqué durant toutes les séries, enlevées entre les exercices différents. Programme MadUp® Force

*

Tableau VI - Consignes de charges et répétitions pour la phase 3 du protocole

1 ^{ère} semaine	50% 1 RM / RPE 6	15 répétitions / séries
2 ^{ème} semaine	60% 1 RM / RPE 7	12 répétitions / séries
3 ^{ème} semaine	65% 1 RM / RPE 7-8	10 répétitions / séries
4 ^{ème} semaine	70% 1RM / RPE 8	8 répétitions / séries
5 ^{ème} semaine	75% 1RM / RPE 8-9	6 répétitions / séries

Une étude d'Ebben et al. (2009) s'est intéressée à l'activation musculaire lors de différents exercices. Il en ressort que pour les ischio-jambiers, le soulevé de terre est le meilleur exercice en termes d'activation du biceps fémoral suivi du good morning puis du squat en co-activation. Pour le quadriceps, l'activation la plus importante du droit fémoral et des vastes est pendant le leg extension, puis le squat et les fentes. Ainsi, les différents exercices proposés dans notre protocole proposent une activation intéressante des muscles que nous avons jugés comme cible de travail. L'alternance d'exercice uni et bipodal, d'exercices en chaîne cinétique ouverte et en chaîne cinétique fermée mais aussi d'exercices mono et poly-articulaires sur machine et à poids libres permet un renforcement musculaire varié et complet (American College of Sports Medicine, 2009 ; Schoenfeld et al., 2021). Plusieurs études ont prouvé que l'exercice excentrique post-reconstruction du LCA est meilleur que l'exercice concentrique traditionnel pour améliorer la récupération de la force quadriceps et procurent de nombreux avantages aux fibres musculaires (Lepley et al., 2015 ; Stojanovic et al., 2023). C'est pour cette raison qu'une phase excentrique de 2s est présente sur chaque répétition.

2.4.4. Evaluation des critères de reprise et décision de RTR (semaines 14 à 16)

Après les 14 semaines (3 mois et demi), les patients seront convoqués à une visite pour passer une batterie de tests avec un investigateur qui ne connaîtra pas l'allocation du patient. Cela permettra de définir si le patient est considéré apte à la reprise de la course ou non, mais aussi de récolter leur niveau de préparation psychologique à la reprise d'activité.

- Réponse aux questionnaires :

Les patients recevront une forme papier de 2 questionnaires :

- International Knee Documentation Committee subjective knee score dont la version française est disponible en *Annexe 23 à Annexe 25*.
- ACL-RSI (pas d'impact sur la décision de RTR, seulement à visée exploratoire). La version française de ce dernier est disponible en *Annexe 26 et Annexe 27*.

Ils répondront seul à ces questionnaires dont les résultats seront ensuite récoltés par les examinateurs.

- Evaluation clinique des critères de reprise de la course à atteindre : inspirés de Rambaud et al. (2018) et Pairot de Fontenay et al. (2022).
- Douleur < 2/10 sur l'échelle visuelle analogique (EVA)
- Extension active complète (absence de flexum) avec verrouillage actif
- Amplitude de flexion à 95 % par rapport au côté non opéré
- Pas de gonflement (œdème) = Sweep/Stroke Test à 0 (cf *Annexe 28*)
- Force isométrique IJ et quadriceps à 75 % par rapport à l'autre côté = Score LSI avec dynamomètre manuel de traction DYNAMO PLUS de chez VALD® (en *Annexe 29 et Annexe 30*, vous retrouverez le protocole d'évaluation de la force utilisé)
- Single hop test à 70% par rapport côté non opéré (protocole d'évaluation en *Annexe 31*)
- Score IKDC > 64
- Single leg squat (SLS) test validé sans augmentation du valgus dynamique. Ce test permettra d'avoir un aperçu de la présence potentielle de déficits neuromusculaires. Ce dernier permettra de vérifier si l'impact musculaire proximal au brassard lors de l'exercice avec BFR démontré par Hedt et al. (2022) est confirmé. Ceci serait très intéressant afin d'engendrer un renforcement musculaire des muscles fessiers et plus globalement du complexe lombo-pelvien qui a une importance majeure dans la stabilité et la cinétique du membre inférieur. Se référer à l'*Annexe 32* pour la description du test.

Un graphique présent en *Annexe 33* reprend les critères permettant de décider du RTR.

Par la suite, les patients ayant atteints les critères se verront proposé un programme de réintroduction (*tableau VII*) de la course sur 2 semaines. En revanche, si le patient ne remplit pas les critères de reprise de course, il sera considéré comme ayant échoué au test de reprise de course et ne participera pas à la suite du protocole de reprise de course proposé. Il sera renvoyé pour une poursuite de sa prise en charge libérale en indiquant quels éléments du test sont défailants et donc à travailler.

Tableau VII - Programme de Réintroduction de la course (semaines 14 à 16)

	Echauffement	Travail	Récupération
Semaine 1			
Jour 1	5 min de marche	3 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 2	5 min de marche	4 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 3	5 min de marche	5 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Repos			
Jour 4	5 min de marche	6 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 5	5 min de marche	7 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Repos			
Semaine 2			
Jour 6	5 min de marche	8 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 7	5 min de marche	9 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 8	5 min de marche	10 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Repos			
Jour 9	5 min de marche	11 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche
Jour 10	5 min de marche	12 x (1' marche - 1' course)	5 min de marche

Remarque sur l'adaptation du protocole : Un genou symptomatique (qui peut être caractérisé par une augmentation de la douleur, de l'épanchement et / ou des restrictions d'amplitudes) après des exercices de marche, de renforcement et / ou d'endurance musculaire suggère une application de charge / intensité trop élevée et demande une réévaluation et une adaptation. Dans ce cas, il convient de retarder le RTR, quel que soit le délai postopératoire, nous nous baserons sur les critères cliniques. Le protocole de reprise de la course proposé est adapté de l'étude de Pairo de Fontenay et al. (2022) mais aussi de la Clinique du coureur. Ce dernier répond aux critères des programmes de RTR proposés par Van Cant et al. (2022).

Les patients seront en autonomie pour ce programme de RTR et ne reviendront vers les investigateurs que 2 semaines après, sauf si nécessaire ou dans le cas d'évènements indésirables majeurs. Ils réaliseront la course comme ils le souhaitent, sur terrain plat à une

vitesse confortable pour le patient et avec une montre/appareil mobile permettant de tracer le parcours réalisé, la durée et la vitesse de course.

Pour la progression, après chaque course, le patient autoévalue sa douleur durant la course de 0 à 10 :

- Si douleur $\leq 2/10$. Attendre et voir si une douleur existe 1h après la séance.
 - Si non, c'est OK, passons à l'étape suivante le lendemain.
 - Si oui, évaluer l'épanchement du genou le lendemain matin.
- Si douleur $> 2/10$ = épanchement le lendemain matin ?
 - Non = répétons la séance de la veille
 - Oui = revenons à la session antérieure (niveau n-1) après une journée de repos.

Si après une journée de repos les symptômes persistent, il convient d'arrêter le programme.

Ex : Le jeudi, j'en suis au niveau 4. Je ressens une douleur cotée à 5 et j'ai un épanchement le lendemain matin. Le vendredi, je réalise une journée de repos. Le samedi, je réalise une séance de niveau 3. Un algorithme décisionnel pour les patients est présent en *Annexe 34*.

Une fiche d'aide à l'auto-évaluation de l'épanchement est présente en *Annexe 35*. Cette dernière permettra au patient de pouvoir évaluer lui-même son épanchement le matin. Malgré tout, en cas de difficultés rencontrées, les patients auront la possibilité de contacter un référent de l'étude pour des explications détaillées au téléphone ou en visio.

Les patients attribueront aussi une note à chaque course /10 sur le niveau de difficulté ressenti (RPE) durant cette dernière.

→ Ainsi, il y a 14 jours de reprise de la course avec 4 jours de repos. 10 niveaux de course à compléter. A la fin des 2 semaines, nous évaluerons le niveau atteint (/10) et le nombre de séances de course réalisées par le patient (/10). Nous calculerons aussi la moyenne du RPE des séances réalisées (/10). Le *tableau VIII* résume ce paragraphe.

Tableau VIII - Scores utilisés pour évaluer le retour à la course pratique

Nombre de séances réalisées	Niveau atteint	Moyenne RPE
... / 10	... / 10	... / 10
Commentaires / Ressentis	...	

Après les 2 semaines, les patients rapporteront leurs données de course (tracés). Les examinateurs calculeront les 3 scores. Ces scores ne sont pas validés dans la littérature et seront donc non valables d'un point de vue statistique mais permettront d'avoir une idée de

l'impact d'une rééducation BFR sur la réalisation d'un programme de RTR. Lors d'un entretien final (à 4 mois), les examinateurs chercheront également en plus de ces 3 scores quelques informations subjectives supplémentaires sur le déroulé de cette reprise de course par le biais d'un entretien : effets Indésirables (lesquels et durée/intensité), appréhension, instabilité...

Toute cette fin de protocole aura peu de valeur scientifiquement parlant dans les résultats du fait des tests non validés qui sont utilisés. Cependant, d'un point de vue clinique, ces informations pourraient apporter des éléments intéressants sur la reprise de course et pourrait permettre d'observer s'il existe une corrélation entre validation des critères de reprise et réussite de la reprise de course sans exacerbations.

Voici la *figure 5* qui permet de résumer le déroulé du protocole :

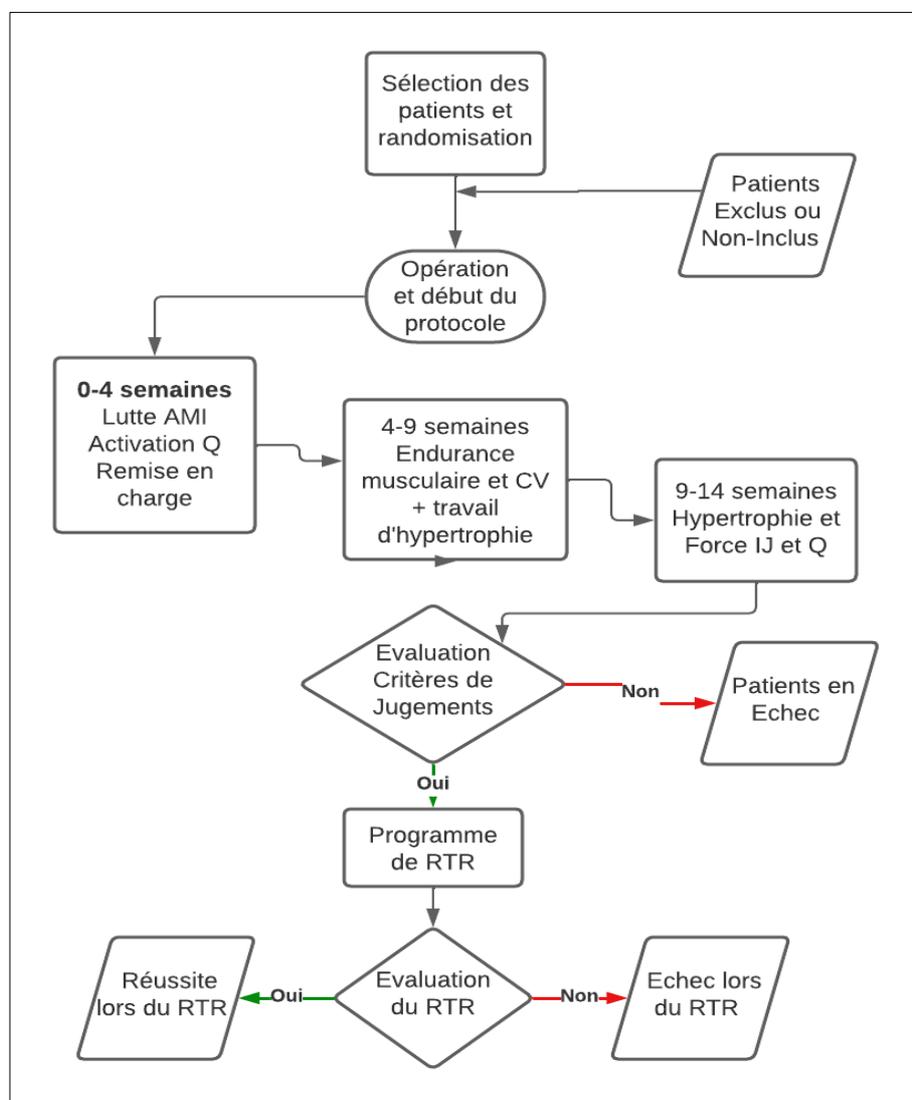


Figure 5 - Présentation graphique des étapes majeures du protocole

2.5. Statistiques et cadre législatif

2.5.1. Statistiques

Le critère de jugement principal de notre étude est le score IKDC, qui a prouvé son intérêt pour prédire la réussite d'un RTR. Nous avons choisi un seul critère de jugement principal afin de limiter le risque d'inflation du risque alpha. Du fait de notre volonté d'aborder le RTR de façon sûre et complète, plusieurs critères de jugement secondaires ont aussi été intégrés à visée exploratoire.

L'hypothèse nulle H_0 considérée est que la rééducation classique procure les mêmes effets que la rééducation avec BFR. La différence entre les deux groupes est ainsi nulle. Nos tests statistiques auront pour objectif de rejeter cette hypothèse. L'hypothèse alternative H_1 à vérifier est qu'il existe une différence dans les effets des deux traitements (possiblement avec Traitement BFR > Traitement Classique). Nous avons donc un test bilatéral.

Le risque alpha de première espèce correspond à la probabilité de rejeter l'hypothèse H_0 alors qu'elle est vraie. Nous choisirons une valeur seuil de 0.05. A noter que le risque alpha augmente avec la multiplication des analyses. Lors des tests lorsque p sera plus petit ou égal au risque alpha, on rejette l'hypothèse H_0 et on accepte H_1 . Le risque Béta de 2^e espèce correspond à la probabilité d'accepter l'hypothèse nulle H_0 alors que H_1 est vraie. Le risque Béta sélectionné sera de 0.20. La puissance du test correspond à $1 - \text{Béta}$ (Gupta et al., 2016). Dans l'étude, nous aurons deux groupes indépendants.

Le score IKDC constitue une variable qualitative ordinale. Pour tester la dépendance de 2 variables qualitatives nous utiliserons le test d'indépendance χ^2 . Nous regarderons comment 2 variables évoluent mais elles peuvent être indépendantes l'une de l'autre. Plus nous sommes proches du -1 : plus les valeurs évolueront en sens inverse, si nous approchons du 0 : aucune corrélation.

A visée exploratoire uniquement, nous pourrions nous intéresser aussi aux différences statistiques entre les groupes sur les différents critères de jugement secondaires :

- ACL-RSI = variable qualitative ordinale = test d'indépendance χ^2
- EVA (douleur <2/10) = variable qualitative ordinale = test d'indépendance χ^2
- Amplitudes Articulaires = variable quantitative (échelle d'intervalle) = test t-student
- Sweep Test = variable qualitative ordinale = test d'indépendance χ^2
- Single Hop Test = variable quantitative (échelle d'intervalle) = test t-student
- Single Leg Squat = variable quantitative (échelle d'intervalle) = test t-student
- Score LSI = variable quantitative (échelle d'intervalle) = test t-student

Nous pourrions aussi évaluer la corrélation éventuelle entre le critère de jugement principal et les critères de jugement secondaire avec le coefficient de corrélation de Spearman.

Les données récoltées seront analysées en intention de traiter. Ainsi, les éventuelles données manquantes (patients sortants ou ne pouvant pas réaliser une évaluation) seront tout de même analysées. Par exemple, si un patient du groupe BFR arrête le protocole du fait d'évènements indésirables associés au BFR, il sera considéré comme n'ayant pas atteint les critères de RTR et les raisons, si elles sont recueillies, seront notifiées dans l'analyse.

2.5.2. Calcul du nombre de patients à inclure

En se basant sur un article de Gupta et al. (2016), nous observons que 5 éléments sont à prendre en compte pour le calcul du nombre de participants : alpha (p value), la puissance (1-Béta), la différence clinique minimale significative (taille d'effet), la variance et le taux d'éventuels participants abandonnant l'étude. Nous disposons d'alpha et de la puissance par convention, en revanche nous n'avons pas trouvé dans la littérature actuelle de score Minimal Clinical Important Difference (MCID) pertinent dans le cadre précis du score IKDC autour du 4^e mois après ACLR, ni de variance (Kanakamedala et al., 2015 ; Nascimento et al., 2023). Nous aurions aussi pu réaliser une étude pilote afin de disposer des informations statistiques nécessaires au calcul du nombre de patients à inclure. Cependant nous avons choisi d'utiliser l'analyse de la littérature actuelle sur le sujet. Nous allons regarder les autres études s'intéressant à l'impact de l'utilisation du BFR sur le score IKDC et d'autres critères de jugements après ACLR afin d'analyser le nombre de participants inclus dans ses études.

Dans l'essai contrôlé randomisé d'Erickson et al. (2019), le but est de trouver une différence de force musculaire entre un groupe contrôle et un groupe BFR. Ils ont calculés que le nombre de participants nécessaires était de 48 participants, et avec un taux d'attrition de 20%, une marge à 60 participants a été incluse. De même, une autre étude (Curran et al., 2020), dont l'objectif est semblable au notre, a inclus exactement le même nombre de patients (48 patients) sans décrire le calcul. Cependant, notons que seulement 34 patients ont complété l'étude et ont fourni des résultats à analyser. Toutes ces études avaient la force comme critère de jugement principal, accompagné de nombreux autres tests cliniques en critères de jugement secondaires, ce qui est similaire à notre étude, hormis pour le critère principal.

Dans leur essai contrôlé randomisé, Hughes, Rosenblatt, et al. (2019) ont inclus un total de 28 patients afin de comparer les effets post-opératoires d'une rééducation avec BFR par rapport à une rééducation à haute charge. Le détail du calcul de cette puissance d'étude était présent dans le protocole. Cependant, comme dans les études précédentes, le critère principal d'évaluation était la force musculaire et pas le score IKDC.

Ainsi, dans le but d'obtenir une puissance importante et permettant d'obtenir des résultats significativement appréciables, nous souhaitons obtenir l'inclusion d'environ 50 patients, soit environ 25 patients par groupe. Avec les risques de perte et d'abandon dans l'étude, nous aimerions obtenir au moins 20 participants par groupe aux évaluations de la 14^e semaine. Notons malgré tout que ce choix constituera un biais car notre puissance sera subjective.

2.5.3. Randomisation

La randomisation s'effectuera pour chaque patient à la fin de sa visite initiale. Nous avons choisi la randomisation stratifiée pour notre étude. Celle-ci permet de contrôler la répartition d'un facteur pronostic entre les deux groupes et ainsi, de limiter l'apparition d'un biais de sélection, bien que certains paramètres comme l'intervention chirurgicale ou le genre ne soient pas contrôlés. Nous établirons 2 listes de patients dans un document Excel en fonction de s'ils ont reçus une rééducation préopératoire ou non. Ensuite, une assignation par blocs prédéfinis et variables en taille et en ordre de séquence sera réalisée au sein de chacune des listes. Le groupe intervention sera codé A tandis que le groupe contrôle aura le code B. La randomisation sera réalisée par une personne tierce à l'étude qui constatera le groupe assigné au patient par la séquence générée dans le *tableau IX* ci-dessous et ajoutera cette information dans le tableau des données démographiques du patient. Les données de randomisation du patient en fonction de son numéro de participant seront transférées à un investigateur de l'étude afin qu'il notifie cette information dans le fichier central.

Tableau IX - Tableau des séquences de randomisation stratifiées par groupe

Groupe Préopératoire			Non Préopératoire		
1	n°XXX	A	1	n°XXX	B
2	n°XXX	B	2	n°XXX	B
3	n°XXX	B	3	n°XXX	A
4	n°XXX	B	4	n°XXX	A
5	n°XXX	A	5	n°XXX	B
6	n°XXX	B	6	n°XXX	A
7	n°XXX	A	7	n°XXX	A
8	n°XXX	A	8	n°XXX	B
9	n°XXX	B	9	n°XXX	B
10	n°XXX	A	10	n°XXX	A
11	n°XXX	A	11	n°XXX	A
12	n°XXX	A	12	n°XXX	B
13		B	13		A
14		B	14		B

2.5.4. Cadre Conceptuel

L'intérêt des personnes qui se prêtent à une recherche biomédicale prime sur les intérêts de la science et de la société d'après la déclaration d'Helsinki (2013). Selon l'Arrêté du 12 avril 2018 fixant la liste des recherches mentionnées au 3° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique (Légifrance, 2018), notre étude est classée RIPH 3 (Recherche Impliquant la Personne Humaine).

Les articles L. 1121-1 et suivants du code de la Santé Publique nous renseignent sur le fait que les recherches interventionnelles portant sur les soins courants ne nécessitent que le passage devant un CPP (Comité de Protection des Personnes). Il faudra y présenter le protocole mais aussi le formulaire d'information et consentement présenté aux patients. Après validation du projet par le CPP, il faudra notifier cette validation et le résumé de l'étude à l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé. L'éventuelle souscription à une assurance avant la première inclusion sera assurée par le promoteur de l'étude, tout comme l'inscription de l'étude au registre des essais cliniques (Inserm pro, 2022).

L'information et le consentement du participant sont nécessaires à toute pratique expérimentale chez l'être humain. Le consentement doit être libre, éclairé et récolté par oral et par écrit. Le sujet aura la possibilité de retirer son consentement à tout moment et ainsi de quitter l'étude s'il le souhaite. Dans ce cas, l'examineur cherchera dans la mesure du possible à notifier les raisons de cette sortie prématurée. De même, les masseurs-kinésithérapeutes libéraux pourront contacter l'examineur afin de soumettre la sortie d'étude d'un patient si son état le nécessite au cours de la rééducation.

La protection des données à caractère personnel est un droit fondamental. Ainsi, il faudra respecter les règles établies dans le Règlement général de protection des données du règlement européen. En se basant sur des publications et référentiels de la Commission nationale de l'informatique et des libertés, plusieurs éléments importants sont mis en avant. En effet, un responsable du traitement des données sera affecté et tiendra un registre des traitements. Les données personnelles des patients récoltées ne seront que des données pertinentes pour l'objectif de la recherche. Ces dernières resteront associées à leur numéro d'anonymat, elles ne sortiront pas du cadre de l'étude et ne seront pas transférées à l'étranger. Les données personnelles pourront être conservées « *jusqu'à 2 ans à compter de la dernière publication des résultats de la recherche* » ou « *en cas de non publication, jusqu'à la signature du rapport final de la recherche* » (CNIL, 2020). Toutes les personnes ayant accès aux données personnelles des participants sont soumises au secret professionnel. L'étude sera conforme à la méthodologie de référence MR-003 (CNIL, 2018).

2.5.5. Estimations temporelles et budgétaires :

Nous avons estimé la durée nécessaire pour les différentes phases de notre étude :

- La plage d'inclusion se déroulera entre 4 et 6 mois selon le nombre de cliniques incluses dans notre étude.
- Un mois environ s'écoulera entre le rendez-vous d'inclusion, l'opération et le début de la rééducation
- Chaque patient réalisera sa rééducation en libéral sur une durée de 4 mois.
- Après 4 mois, les investigateurs disposeront des éléments nécessaires pour l'ensemble des patients et pourront démarrer l'analyse statistique suivie de la rédaction des résultats et de la discussion de l'étude en vue d'une publication. Ainsi, nous envisageons une durée d'environ 1 an au total pour clore l'étude.

Le point de vue budgétaire dépend du promoteur qui devra prévoir au minimum :

- Prix de location du dynamomètre VALD® (50€/mois soit environ 200€ pour l'étude)
- 1 à 2 montres connectées par cabinet associé pour le calcul de la FC des patients par cabinet pour les patients qui ne disposent pas d'un outil de ce type au quotidien (ex : Suunto 3 Fitness à 140€).
- +/- rémunération des cabinets participants à l'étude
- Rémunération des membres de la recherche

3. DISCUSSION

L'objectif de notre étude était d'évaluer dans quelle mesure la rééducation précoce et intensive associée au BFR peut améliorer la phase du retour à la course après ACLR. Nous abordons dans cette partie la projection de l'impact éventuel de ce type de rééducation sur les critères objectifs, subjectifs, physiques mais aussi psychologiques qui peuvent impacter la reprise théorique et pratique de la course.

Etant donné que nous ne disposons pas de résultats pour cette étude, nous allons discuter des résultats envisageables et les confronter à la littérature. Avant cela, nous aborderons un autre mémoire similaire au nôtre et enfin, nous présenterons les forces, faiblesses et perspectives de notre étude.

3.1. Intérêt de cette étude

3.1.1. Intérêt de cette étude pour le patient

La rupture du LCA est fréquente pour les patients pratiquant une activité sportive et elle est associée à de nombreux déficits physiques, cardiovasculaires mais présente aussi un impact psychologique voir social pour certains. La rééducation qui suit la reconstruction est longue et doit être optimisée afin de proposer au patient un retour à l'activité le plus tôt possible, tout en restant sécuritaire et efficace pour ne pas avoir de répercussion à long terme.

Si nos résultats s'avéraient concluants, un moyen d'optimiser la rééducation des patients dans le continuum du RTP pourrait ainsi être mis en évidence. L'utilisation précoce et intensive du BFR permettrait ainsi aux patients de récupérer rapidement une force musculaire et une fonction optimale et ainsi progresser plus rapidement vers l'atteinte des critères de reprise de la course puis, à plus long terme vers les critères de reprise du sport.

Le terme « optimiser » utilisé dans notre étude mérite d'être défini. Il est plausible, selon nous, que l'utilisation du BFR puisse accélérer la rééducation précoce et le retour à la course. Cependant, notre étude cherche à vérifier si le BFR peut « optimiser » la phase de RTR en termes de ressenti des patients durant cette reprise, pas forcément en termes de performance.

3.1.2. Intérêt de cette étude pour les professionnels

Cette étude pourrait servir à informer les professionnels sur l'utilisation de cet outil qu'est le BFR. Contrairement à une majorité d'étude où le BFR est utilisé de façon isolée, sur du vélo, de la marche ou avec un exercice de résistance, nous avons proposé un protocole de

rééducation complet sur plus de 3 mois avec diverses modalités d'application progressive du BFR afin d'observer son effet lors d'une prise en charge globale du patient.

De plus, beaucoup d'études ont évoqué l'intérêt du BFR sur des critères physiques, qu'ils soient objectifs ou subjectifs. Notre étude pourrait permettre de montrer un impact de son utilisation sur une tâche fonctionnelle pratique avec la réintroduction de course et pas seulement sur l'aspect théorique d'atteinte des critères prédictifs du retour à la course.

De même, les résultats présenteront une analyse comparative de la fonction subjective du genou mais aussi de l'appréhension globale du patient lors des activités en fonction des groupes de rééducation. Ainsi, notre étude pourrait mettre en lumière le fait qu'une prise en charge précoce et intensive des déficits de force et fonction neuromusculaire, par le biais du BFR, pourrait avoir à plus long terme un impact sur des facteurs psychologiques. En effet, la confiance dans le genou ou l'appréhension ont été identifiées comme étant des facteurs prédictifs et potentiellement limitant du retour au sport à niveau compétitif.

3.2. Comparaison avec un mémoire similaire

Comme évoqué précédemment, un mémoire récent existe et présente des hypothèses semblables aux nôtres avec la problématique suivante : « *Intérêt du Blood Flow Restriction sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA : revue de littérature et protocole* » (Jaffredo, 2020). Nous allons dans cette partie mettre en lumière en quoi l'approche de notre étude est différente et dans quelle mesure notre protocole est spécifique et encourage la réalisation d'une nouvelle étude sur le sujet.

3.2.1. Différentes Approches

Tout d'abord, il semble important de comparer l'approche globale. Dans le mémoire de 2020, le sujet traitait de l'intérêt de la rééducation avec BFR sur l'atteinte des critères de RTR. En particulier l'atteinte de deux critères objectifs que sont les déficits entre les deux membres en termes de force du quadriceps et de performance aux tests fonctionnels. Or, comme évoqué dans la scoping review de Rambaud et al. (2018) de nombreux autres facteurs doivent entrer en compte dans la décision d'un retour à la course. En effet, la douleur, l'épanchement mais aussi la force des ischio-jambiers doivent être pris en compte. Deux études appuient cette idée en démontrant le rôle des ischio-jambiers lors de la course (Dorn et al., 2012 ; Hanon et al., 2005). Les muscles bi-articulaires comme les ischio-jambiers ou le droit fémoral jouent un rôle important dans la coordination et les générations des mouvements articulaires de la hanche et du genou. La force produite par les ischio-jambiers augmente exponentiellement

avec la vitesse de course (cf *Annexe 36*). Comme le montre également l'*Annexe 37*, la durée d'activation des ischio-jambiers lors de la course est d'environ 70% du cycle de la foulée, soit presque deux fois plus longtemps que les différents chefs musculaires du quadriceps. Malgré tout, comme évoqué précédemment, à des niveaux d'intensités modérées (40-50% VO₂ Max), les quadriceps semblent avoir une amplitude d'activation plus importante que les ischio-jambiers. Ce ratio se réduit avec l'augmentation de l'intensité (Camic et al., 2015).

De plus, un déficit important entre les IJ et les quadriceps serait néfaste pour le greffon puisque les IJ ont un rôle important dans le contrôle du tiroir antérieur et assistent ainsi le néo-LCA dans son travail. Leur faiblesse pourrait donc avoir un impact en entraînant une sur-sollicitation du néo-greffon. Il nous semble primordial de les renforcer et d'évaluer leur niveau de force avant la reprise d'une activité fonctionnelle comme la course à pied. Une étude de Kyritsis et al. (2016) a montré un risque majeur de rupture de greffon en cas de faiblesse des IJ.

La grande différence de notre approche réside dans le fait que nous avons élargi nos critères de jugement pour le RTR par rapport au mémoire de 2020. Nous souhaitons voir s'il existe une véritable incidence sur le retour lorsque des critères, autres que physiques et objectifs, sont utilisés. En effet, en se basant sur plusieurs études abordant la notion de « continuum du RTP », nous avons intégré le fait que la reprise de la course à pied était un retour à la participation pour les patients et une étape majeure avant l'accès à des étapes plus importantes (A. J. Rambaud et al., 2022). Or, lors du retour à des étapes plus exigeantes comme le retour au sport de compétition par exemple, beaucoup de patients n'atteignent pas les résultats espérés, non pas par défaillance physique mais plutôt par défaillance psychologique, par appréhension et par manque de confiance dans le genou. C'est ce que traduisent les scores ACL-RSI faibles chez les patients qui ne retournent pas au sport. De plus, une étude de Sadeqi et al. (2018) a montré que le score ACL-RSI était meilleur à 4 mois chez les patients réussissant leur retour à la course, tandis que Pairo de Fontenay et al. (2022) n'ont pas trouvé de résultats significatifs pour ce score comme prédicteur de la réussite du retour à la course. Il semble judicieux de s'intéresser à nouveau à cette question.

C'est pour cette raison que nous avons fait le choix d'inclure deux critères de jugement subjectifs qui permettent d'aborder les notions psychologiques (ACL-RSI) et de fonction subjective/confiance dans le genou (Score IKDC). Ce dernier score a d'ailleurs récemment montré son intérêt pour prédire la réussite d'un retour à la course chez les patients opérés du LCA lorsque le score était supérieur à 63,7/100 (Pairo de Fontenay et al., 2022). Nous avons ainsi décidé de l'utiliser comme critère de jugement principal de notre étude afin d'avoir un score qui nous permet de prendre en considération le ressenti du patient vis-à-vis de son

genou, la fonction qu'il perçoit de ce dernier et ainsi la confiance qu'il lui accorde dans diverses activités. Bien que subjectives, toutes ses notions sont importantes et à prendre en compte dans le retour à l'activité où les scores objectifs et les tests physiques ne reflètent pas toujours les capacités des patients. Il a été prouvé que les athlètes qui sont retournés au sport avaient un score IKDC et des indices de symétrie de force entre les membres plus élevés, mais aussi un score ACL-RSI plus important (score >56) (Ardern et al., 2013). Le RTR étant une étape vers le RTP, il semble donc judicieux d'évaluer et d'agir sur l'ensemble de ses critères dès les phases précoces du continuum du RTP.

Notons que dans le mémoire de 2020, le score de Lysholm, qui évalue la fonction subjective du genou dans différentes activités, est utilisé afin de juger si les patients sont capables de passer les tests physiques. Il permet ainsi d'aborder les notions de douleur, d'épanchement et de fonction subjective dans certaines activités. Mais dans ce protocole, ces résultats ne font pas partie des critères de jugement, ce sont des critères d'exclusion au passage des évaluations. A notre connaissance, ce score, contrairement au score IKDC, n'a pas démontré de corrélation avec le RTR. L'utilisation dans cette étude d'une évaluation intermédiaire, non analysée, mais qui permet d'accéder aux tests suivants nous paraît en revanche intéressante. En effet, cela permet de proposer les tests pertinents pour l'analyse uniquement à un certain nombre de patients dont la fonction du genou est jugé suffisante. Ce type de méthode aurait pu nous permettre de diminuer le nombre global d'évaluations analysées dans notre étude.

La proposition d'un programme de réintroduction de la course permet aussi de différencier les deux études. En effet, dans notre étude, les patients qui atteignent les critères de reprise se voient proposé une réintroduction progressive de la course sur 2 semaines, suivi d'une réévaluation de plusieurs critères. Comme le montre les résultats mitigés du retour au sport malgré l'atteinte des critères de reprise, la validation de ces critères ne justifie en rien le retour à une activité réussie. C'est pour cela qu'il nous a semblé intéressant, à visée exploratoire, de pouvoir découvrir si une corrélation existait entre atteinte des critères de RTR et réussite du programme de RTR. Cette évaluation supplémentaire semble importante puisqu'aucune étude à l'heure actuelle n'a évalué l'impact du BFR sur la reprise de course en pratique. Au vue de la littérature actuelle, il est difficile de projeter les impacts du BFR sur une activité fonctionnelle telle que la course à pied malgré des impacts positifs de cet outil sur certains critères de reprise. Ainsi, cette partie du protocole nous permet d'avoir une analyse à la fois quantitative (critères de reprise, nombre de séances réalisées) mais aussi qualitatives (retours des patients, évènements indésirables) et donc d'évaluer le RTR dans son ensemble.

3.2.2. Des protocoles différents

Avant d'aborder les différences au sein même des protocoles proposés, il est important d'aborder l'essence même de la rééducation au sein de ces derniers. Bien que ces deux protocoles mettent en avant la notion de rééducation accélérée de Shelbourne et Nitz. (1990), une différence d'intensité existe. Nous pouvons remarquer que le mémoire de 2020 propose un protocole basé sur 12 semaines d'entraînement avec un total de 25 sessions d'entraînement sur cette période. Dans notre protocole, l'entraînement, avant évaluation des critères de RTR, se déroule sur 14 semaines et est composé d'un total de 64 sessions d'entraînement. Notre protocole proposera ainsi une rééducation plus intensive. Les études sur le sujet dans la littérature sont contradictoires. De fait, une étude de Dubljanin-Raspopović et al. (2006) a démontré que des critères physiques tels que la circonférence de la cuisse, les tests de fonction subjective et les tests fonctionnels étaient meilleurs dans un groupe de rééducation intensive par rapport à une rééducation conservatrice à moyen et à long terme. De même, une autre étude de Dragicevic-Cvjetkovic et al. (2014) a confirmé ses constatations avec une amélioration fonctionnelle plus complète et plus rapide pour les patients ayant réalisés un protocole de rééducation avec 5 séances par semaines, sur 20 semaines. En revanche, une étude de Provencher et al. (2023) sur un protocole de rééducation intensive n'a pas amélioré le retour au sport des patients à long terme. Cette rééducation intensive avait démarrée à 3 mois post-opératoire, contrairement aux autres études et la nôtre où la rééducation intensive était précoce.

L'ensemble des points communs et des différences entre ces protocoles sont détaillées dans un tableau *en Annexe 38*. Nous constatons une différence en termes d'inclusion pour le niveau d'activité physique des patients sur le TAS. Le mémoire de 2020 s'adresse plutôt à une catégorie de patients sportifs de haut niveau tandis que notre étude s'adresse à une population se rapprochant plutôt du sport loisir/compétitif, sans être dans le haut niveau.

Intéressons-nous désormais à cette citation d'un article de l'American College of Sports Medicine (2009) : « *Il est recommandé d'utiliser une fréquence de 3 à 4 jours par semaine pour passer à un entraînement intermédiaire (3 jours pour un entraînement du corps entier, 4 jours pour une routine fractionnée entraînant ainsi chaque groupe musculaire majeur deux fois)* ». De même, une revue systématique de Schoenfeld et al. (2016) prône la nécessité d'entraîner au moins deux fois par semaine chaque groupe musculaire, afin d'avoir des adaptations significatives. L'hypertrophie musculaire devient évidente au cours des 6 premières semaines, bien que des changements dans la qualité et les taux de synthèse des protéines se produisent beaucoup plus tôt (American College of Sports Medicine, 2009). Ces

éléments nous permettent de mettre en lumière le fait que notre protocole répond plutôt bien à ces attentes. En effet, dans la phase 2 du protocole, nous retrouvons 2 séances de travail d'hypertrophie par semaine composées de 4 exercices permettant un travail musculaire varié. Le travail hypertrophique majeur démarre à la 9^{ème} semaine et correspond aux recommandations. Nous proposons 2 séances par semaine de renforcement ciblées sur les ischio-jambiers et 2 séances de renforcement ciblées sur le quadriceps. Le travail hypertrophique dans notre étude démarre dès la semaine 4, voire avant, même si les exercices proposés renvoient plutôt à une lutte contre l'atrophie. Ainsi, sur l'ensemble du protocole, nous retrouvons un travail hypertrophique progressif sur 10 semaines.

Deux études de Schoenfeld et al. (2021 ; 2016) ont démontré qu'une fréquence minimum de stimulation par groupe musculaire existait pour obtenir des adaptations. Il a été démontré qu'au moins 10 séries hebdomadaires par groupe musculaire étaient nécessaires pour maximiser les augmentations de masse musculaire. Nous constatons, donc, que notre protocole permet, assez largement, dans les phases 2 et 3 du protocole, d'atteindre ce stimulus nécessaire de 10 séries par groupe musculaire et ce à la fois sur le quadriceps et les ischio-jambiers. Dans le mémoire de 2020, nous pouvons noter que les séances de renforcement hypertrophique sont composées de 2 semaines de leg press puis de 8 semaines de leg extension, sur 2 séances par semaine. La variété d'exercice dans ce protocole est volontairement moindre et plus ciblée sur le quadriceps. Même si une rééducation classique avec un travail des autres muscles est mise en place en complément dans cette étude, les effets du renforcement avec BFR ne sont pas étudiés sur ces muscles. Dans notre étude, nous avons choisi de proposer une appréciation globale de l'utilisation variée du BFR et son impact sur le système musculaire du membre inférieur dans son ensemble. Les recommandations sur l'importance des modalités d'exercices variées pour le stimulus musculaire lors de l'entraînement hypertrophique de Schoenfeld et al. (2021) montrent que notre protocole se rapproche des recommandations actuelles avec des exercices différents et donc des activations musculaires variées.

De Queiros et al. (2023) ont également montré que lorsque le muscle atteint un certain niveau de fatigue, lors de l'exercice avec BFR, l'augmentation du nombre de répétitions n'aurait pas un grand intérêt, suggérant la présence d'un plafond. Ceci est confirmé par l'étude de Martin-Hernández et al. (2013) qui ont montré que des entraînements à 75 et 150 répétitions par exercice produisaient les mêmes effets hypertrophiques sans différence significative. Dans le protocole du mémoire de 2020, en fonction de la phase, il y a 4 fois 75 répétitions de presse ou de leg extension à réaliser, ce qui en lien avec ce que nous venons d'évoquer, pourrait s'avérer non-productif. Nous avons choisi une approche différente avec 75

répétitions par exercice dans la phase 2 puis un nombre de répétitions moindre par la suite, du fait de l'élévation de la charge. Ainsi, le nombre de répétitions par exercice est raisonnable. Le nombre de répétitions par groupe musculaire peut lui, en revanche, s'avérer élevé mais étant donné que les exercices sont variés, les stimuli et l'activation des fibres musculaires ne sont pas identiques.

Enfin, nous n'utilisons pas l'entraînement sous occlusion uniquement dans sa forme associée avec l'exercice en résistance. Nous l'utilisons aussi avec des tâches fonctionnelles et aérobies. Par exemple, dans la phase précoce de rééducation, il est associé à des exercices de passage du pas puis à des exercices de marche continue. Enfin, dans la 2^e phase de notre protocole, le BFR est appliqué lors d'un exercice en interval training sur vélo. Ceci nous a semblé important dans l'objectif du RTR à moyen terme. En effet, l'ajout de travail fonctionnel et d'un effort cardio-vasculaire, en plus du renforcement musculaire, nous semble adapté en vue d'une reprise de course et du fait des déficits fréquents après rupture du LCA.

3.3. Résultats envisagés

Les résultats de cette étude pourraient mettre en valeur plusieurs situations avec des répercussions cliniques variées que nous allons détailler :

- Un résultat significativement meilleur du score IKDC dans le groupe BFR démontrerait l'amélioration de la perception de fonction subjective du genou par le patient. Pairoit de Fontenay et al. (2022) ont montré que les patients ayant un score supérieur à 64 ont 3 fois plus de chance de réussir leur RTR (Sensibilité 77,8% : et Spécificité : 75%). Si ce résultat est associé à des valeurs significativement plus importantes pour l'ensemble de la batterie de test de RTR de Rambaud et al. (2018) mais aussi au score ACL-RSI, alors nous pourrions valider l'hypothèse que la rééducation précoce avec BFR favorise l'atteinte des critères physiques et psychologiques permettant le retour à la course. Enfin, si ces résultats positifs sur les critères de RTR sont associés à un taux de réussite subjective du programme de réintroduction de course plus élevé, alors nous pourrions également valider l'hypothèse de l'impact d'une rééducation avec BFR sur la reprise de la course d'un point de vue pratique. Si tel était le cas, l'intérêt serait important avec de nombreuses données exploratoires mises en évidence. Ceci pourrait encourager à la réalisation de futures études plus centrées sur un critère précis pour validation (RTR en pratique, impact psychologique...). D'un point de vue clinique, de tels résultats pourraient souligner l'intérêt élargi du BFR dans la rééducation précoce après ACLR avec un impact clinique théorique mais aussi fonctionnel avec la course.

- En revanche, si les résultats étaient significatifs pour le score IKDC mais pas pour les critères de jugement secondaires, alors nos hypothèses de départ ne pourraient pas être validées. Il y aurait un intérêt clinique car il a été démontré que les patients ayant repris la course, mais aussi le sport, avaient un score IKDC plus élevés (Arderm et al., 2013). Cependant, de tels résultats impliqueraient un intérêt limité de l'utilisation du BFR qui serait discuté en fonction du nombre de critères de RTR sur lesquels il agirait significativement. En effet, comme nous avons beaucoup de critères de jugement secondaires, le BFR pourrait ne pas avoir d'impact sur l'un de ces derniers mais pour autant présenter un intérêt clinique. Par exemple, si le BFR présente un effet significatif sur le score IKDC, la batterie de test et le programme de réintroduction de course, il aurait une utilité clinique importante même s'il ne montre pas d'impact significatif sur la préparation psychologique des participants.

- Dans la situation où aucune différence significative ne serait trouvée entre les deux groupes pour le score IKDC mais qu'en revanche le groupe BFR présenterait de meilleurs critères de jugement secondaires, plusieurs de nos hypothèses pourraient être validées. En effet, la majorité des critères autorisant le RTR serait atteinte mais, surtout, un impact significativement meilleur serait présent sur la reprise réelle de course. Ces données pourraient encourager la réalisation d'études cliniques moins globale en termes d'évaluation et plus centré sur l'un des éléments exploratoires mis en lumière pour valider nos données.

- Enfin, si aucun des critères de jugement n'est significativement différent entre les deux groupes, alors aucune de nos hypothèses ne pourrait être validée et nous devrions conclure à l'inefficacité du BFR dans l'optimisation de la sphère bio-psychologique au moment du retour à la course. Le BFR ne serait ainsi pas une option clinique satisfaisante dans le cadre de la rééducation postopératoire précoce après reconstruction du LCA. Ces résultats, s'ils existaient, pourraient être liés à diverses raisons. Par exemple, une utilisation trop variée et pas assez efficace du BFR ou encore un protocole trop intense pour les deux groupes qui permet d'atteindre de très bon résultats dans l'ensemble des groupes mais sans différences significatives pour le groupe intervention.

Désormais, nous allons confronter plusieurs de nos critères de jugement à la littérature afin de pouvoir projeter les possibles résultats de notre protocole.

3.3.1. Score IKDC

En se basant sur notre critère de jugement principal qu'est le score IKDC, trois études ressortent et s'opposent.

L'étude de Curran et al. (2020) a montré que 8 semaines d'entraînement avec BFR en plus de la rééducation classique ne permettaient pas d'améliorer différents marqueurs fonctionnels. En effet, il n'y avait aucune différence significative avec le groupe contrôle sur le score IKDC, la force et le volume du quadriceps au moment du retour à l'activité. Notons tout d'abord que lors de cette étude l'application du BFR n'a débuté qu'à partir de la 10^{ème} semaine post-opératoire et consistait en 2 séances de presse unilatérale par semaine avec 5 séries de 10 répétitions. Le BFR était administré à une pression d'occlusion de 80 %.

Dans leur essai contrôlé randomisé, Hughes, Rosenblatt, et al. (2019) ont comparé les effets post-opératoires d'une rééducation avec BFR par rapport à une rééducation à haute charge. Les exercices BFR ont démarré dès 2 semaines post-opératoires, soit un début de rééducation similaire à notre protocole. Comme dans l'étude de Curran et al. (2020), le protocole consistait à réaliser 2 séances de presse unilatérale par semaine sur 8 semaines avec une pression d'occlusion fixé à 80% de la LOP. Mais contrairement à ce qui avait été trouvé dans leur étude, Hugues et al. (2019) ont obtenu des résultats favorables au BFR. En effet, leur protocole a permis d'améliorer la force et l'hypertrophie musculaire, de diminuer la douleur et l'épanchement articulaire et ainsi d'améliorer la fonction globale du genou et notamment le score IKDC, avec une augmentation significative de ce dernier dans le groupe BFR. Des résultats similaires pour le score IKDC sont présents dans l'étude d'Okoroha et al. (2023) lors de l'évaluation à 6 semaines post-opératoires mais pas à 12 et 24 semaines.

Les différences principales entre ces études résident dans le protocole imposé au patient. En effet, dans l'étude de Curran et al. (2020), les charges appliquées associées au BFR étaient élevées (70% 1 RM) et le BFR a démarré à 10 semaines post-opératoires tandis que dans les autres études, les charges étaient à 30% 1RM et l'application du BFR était démarrée de façon précoce. (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Okoroha et al., 2023)

Le BFR est réputé pour son utilité afin d'avoir une adaptation musculaire chez des individus dont les capacités à supporter des charges élevées sont limitées. C'est pourquoi, son utilisation de façon précoce après une opération du LCA semble plus efficace qu'à plus long terme (10 semaines). En effet, ceci permet d'avoir un travail musculaire précoce sans appliquer trop de contraintes sur l'articulation et le greffon et ainsi de lutter de façon précoce contre le phénomène atrophique. Nous retrouverons plus rapidement une fonction optimale

du genou. Le fait que cet effet favorable du BFR sur le score IKDC soit atténué par le temps avec une différence significative à 6 semaines mais pas à 12 et 24 est intéressant et met en lumière le fait que le BFR serait important pour la fonction précoce mais serait de moins en moins utile avec l'avancée dans la rééducation (Okoroha et al, 2023). Notons que cette étude diffère de celle que nous avons proposée en termes d'intensité de rééducation et de charge. Un tableau présentant le détail des protocoles évoqués est présent *en Annexe 39*.

Ainsi, nous posons l'hypothèse que dans le cadre de notre protocole, le score IKDC pourrait être meilleur au sein du groupe intervention par rapport au groupe contrôle, et permettre un taux plus élevé de participants susceptibles de réussir leur RTR. Dans le cas où il n'y aurait pas de différences significatives, il faudrait s'intéresser à la pertinence clinique des résultats. L'étude de Pairot de Fontenay et al. (2022) a montré qu'un score IKDC > 64 était prédicteur de la réussite du RTR. Il faudra ainsi regarder la proportion d'individus ayant dépassé cette valeur au sein du groupe intervention par rapport au groupe contrôle.

3.3.2. Force Musculaire

Nous allons désormais nous intéresser à un autre critère de jugement qui est en lien avec le score IKDC, la force musculaire. En effet, la force musculaire du quadriceps influence la fonction subjective du genou et les performances physiques (Lepley et al., 2015 ; Palmieri-Smith et al., 2015).

Par rapport à la phase 1 du protocole, comme évoqué dans la revue de littérature de Charles et al. (2020), le BFR est un outil efficace pour lutter contre l'atrophie. Cependant, cette revue a démontré que le début retardé de cette utilisation pouvait avoir un impact négatif sur les adaptations musculaires. Par exemple, une étude avec un début de protocole BFR à 10 jours post-opératoire n'a obtenu aucun résultat contrairement à toutes les autres études ayant démarrées dans les jours suivant l'opération. Ainsi, le fait que notre protocole démarre « dans les 2 semaines post-opératoires » pourrait limiter les résultats puisque l'impact sur l'atrophie serait moins important car moins précoce. Comme évoqué dans la revue de Lyp et al. (2018), les scores subjectifs de fonction du genou sont aussi inversement liés au temps écoulé entre la chirurgie et le début de la rééducation. Malgré tout, cette vision plus large nous semblait plus adaptée à la réalité clinique et à la pluralité éventuelle de chirurgiens associés à l'étude.

Nous avons vu précédemment que le gain de force demande des charges élevées avec peu de répétition. Il semble ainsi difficile de gagner en force dans la rééducation du LCA puisqu'atteindre de telles charges à un stade précoce de rééducation serait néfaste pour le patient et le greffon et pourrait engendrer des mécanismes douloureux et inflammatoires.

L'intérêt du BFR pour le gain de force précoce a donc été évoqué dans la littérature. En effet, diverses études ont démontré que l'entraînement avec de faibles charges (30% 1RM en moyenne) permettait d'améliorer la force musculaire chez des patients post-reconstruction du LCA (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Ohta et al., 2003 ; Patterson et al., 2019 ; Scott et al., 2023). Ainsi, nous pourrions projeter le fait qu'un protocole de rééducation avec BFR améliorera la force musculaire dans une plus grande proportion par rapport à un groupe contrôle pratiquant une rééducation classique. Cependant, il faut noter que plusieurs études et une revue de Colapietro et al. (2023) ont démontré qu'il n'existait pas d'améliorations significatives de la force musculaire grâce à une rééducation avec BFR post-reconstruction du LCA (Cuyul-Vásquez et al., 2020 ; Iversen et al., 2016). En *Annexe 40*, vous pouvez retrouver un tableau présentant les différents protocoles des nombreuses études s'intéressant à la force.

Les exercices aérobie, qu'ils soient associés à de la marche ou à du vélo, ont aussi prouvés une amélioration de l'hypertrophie, de la force musculaire dynamique et isométrique et de la section transversale des muscles de la cuisse (Silva et al., 2019). Par exemple, une étude utilisait un protocole similaire au notre (de Oliveira et al., 2016). Il y avait en effet, 5 à 8 répétitions d'interval training sur vélo avec 2 minutes du travail et 1 minute de repos. Avec leur protocole de 3 sessions par semaine sur 4 semaines, ils ont prouvé une amélioration de 11% de la force musculaire dans le groupe BFR. Ainsi, même si nos patients devraient pratiquer légèrement moins de séances que dans cette étude, nous pourrions poser l'hypothèse que notre protocole va permettre une amélioration significative de la force musculaire dans le groupe BFR par rapport au groupe contrôle. Il faut tout de même noter que ces adaptations musculaires et cardio-vasculaires ne sont pas toujours présentes lorsque l'on associe le BFR et l'exercice aérobie (Abe et al., 2010 ; Bennett et al., 2019 ; Silva et al., 2019).

Plusieurs études ont démontré des déficits de force important pour le quadriceps à long terme (6 mois) avec des déficits entre 20 et 30% par rapport au côté opposé (Grapar Žargi et al., 2017 ; Lepley et al., 2015). Ces déficits sont également évoqués pour les ischio-jambiers (Buckthorpe & Della Villa, 2020). Nous remarquons que la valeur de 25% de déficit maximal est choisie pour autoriser le retour à la course à 3 mois. Ceci peut supposer qu'une atteinte de ce chiffre à 3 mois est compliquée étant donné qu'un certain nombre de patients ne l'atteint pas à 6 mois. Malgré tout, étant donné que nous respectons les recommandations d'exercices de la littérature et que nous y associons l'utilisation du BFR qui serait un outil favorable dans les phases précoces de rééducation, nous posons l'hypothèse d'avoir une amélioration significative de la force musculaire. Nous pensons retrouver ces résultats dans les deux groupes avec des valeurs proches de celles attendues pour autoriser un retour à la course.

En termes de différence significative entre les groupes, nous émettons l'hypothèse que la longue durée du protocole et son aspect intensif pourraient être des facteurs masquant l'intérêt du Blood Flow Restriction par le volume de travail et les adaptations musculaires qui seront compensées dans le groupe contrôle par l'intensité du protocole et l'ajout de charge dans la dernière phase. Ainsi, l'ajout d'évaluations intermédiaires des critères de jugement aurait été intéressant pour avoir une analyse plus complète de nos résultats.

3.3.3. Douleur/Epanchement

La douleur est un marqueur important pour le thérapeute mais aussi pour le patient car cette douleur peut impacter sa motivation, ses activités quotidiennes mais aussi son humeur. Comme évoqué dans l'introduction, plusieurs études ont démontré que les exercices avec BFR associés à de faibles charges pouvaient avoir un effet hypo-algésique avec une diminution des douleurs articulaires sur les jours suivants l'exercice (Hughes, Rosenblatt, et al., 2019 ; Scott et al., 2023). Cependant, notons que notre protocole est très intensif et même s'il implique peu de charge sur le genou, beaucoup de répétitions et de travail sont imposés précocement au genou, encore inflammatoire en post-opératoire, ce qui pourrait entretenir ce phénomène avec l'épanchement et la douleur. L'application de cryothérapie compressive pourrait aussi avoir un impact sur ces critères et être associé à l'impact du BFR sur la diminution de douleur. Ainsi, nous pouvons imaginer que la rééducation sur plus de 3 mois avec le BFR aura un impact positif sur la douleur chez les patients et devrait permettre aux patients du groupe intervention de valider ce critère nécessaire à un RTR optimal.

3.3.4. Facteurs Psychologiques

Rappelons que l'intérêt d'avoir intégré le score ACL-RSI est à visée exploratoire pour évaluer la préparation psychologique. Le RTR fait partie d'un continuum dont l'objectif final est le RTP au niveau antérieur. Cependant, la littérature a montré que les chiffres de RTP au niveau antérieur ou compétitif sont à des taux plutôt faibles après la reconstruction du LCA, et ce malgré des conditions physiques parfois optimales (Sadeqi et al., 2018). Les facteurs psychologiques sont ainsi souvent mis en cause dans ces échecs de reprise (Arden, Österberg, et al., 2014). Le score ACL-RSI a été évalué comme étant prédicteur de réussite du RTR à 4 mois (Zarzycki et al., 2021) tandis que Pairo de Fontenay et al. (2022) n'ont pas trouvé de différence significative entre les répondants et non répondants à un programme de RTR. Bien que ce résultat ne soit pas statistiquement significatif, le score moyen ACL-RSI était bien meilleur dans le groupe ayant repris la course que dans le groupe ayant échoué (56,5 vs 48,8) (Pairo de Fontenay et al., 2022).

A l'heure actuelle, aucun article n'a montré que la rééducation par le biais d'exercice avec BFR pouvait avoir un impact sur la préparation psychologique d'un patient. Cependant, une faible fonction de genou et peu de confiance accordée à ce dernier seraient des éléments souvent corrélés à des scores ACL-RSI bas (Webster et al., 2018). Or, ces deux éléments sont des critères analysés au sein du score subjectif de fonction du genou IKDC. Ainsi, le fait d'améliorer ce score pourrait permettre d'avoir un impact sur le score ACL-RSI. De plus, comme évoqué dans l'introduction, une étude de Zarzycki et al. (2021) a démontré une corrélation entre ACL-RSI et score IKDC, sans être capable de définir le sens de cette relation. Chmielewski et al. (2008) ont mis en avant le fait que les patients présentant une plus grande peur de récurrence de blessure avaient des altérations cinématiques plus importantes et une fonction subjective du genou moins bonne. Ainsi, l'ACL-RSI aurait un impact sur le score IKDC et l'exercice perçu. En revanche, il est impossible de conclure sur l'effet inverse. Malgré tout, nous supposons que la rééducation précoce avec BFR, permettant un gain de force musculaire, une diminution de douleur et une récupération fonctionnelle optimale pourrait avoir un impact sur l'aspect psychologique du patient et lui donner confiance en son genou. De plus, nous posons l'hypothèse que l'exercice intense, varié et progressif que nous proposons devrait permettre aux patients de prendre confiance et d'avoir conscience de leurs capacités physiques. Cependant, à ce stade et avec le peu d'informations disponibles, il est impossible de conclure sur l'impact que pourrait avoir le BFR sur les facteurs psychologiques au moment d'une activité comme le RTR. La course étant une activité en ligne, il y a un risque très faible de blessure, qui pourrait expliquer que les participants n'aient pas de limitation psychologique.

3.3.5. Réintroduction de Course

Nous avons intégré un programme de réintroduction de course à la fin du protocole pour les patients atteignant les critères de reprise. A notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'impact d'une rééducation avec BFR sur le RTR pratique après ACLR. Il est important de rappeler que la course à pied est une tâche qui demande de la force et du contrôle neuromusculaire. Chaque étape de la course représente environ 2 à 3 fois la masse corporelle (Cavanagh et al., 1980). Ainsi, l'atteinte des critères de jugement évoqué plus tôt est essentielle. Comme évoqué précédemment dans l'introduction, il y a des altérations biomécaniques lors de la course (Pairot de Fontenay et al., 2023). Cependant, par le biais de notre étude nous analysons uniquement à quel point le retour à la course est supporté par les participants. Plusieurs études ont montré que les altérations biomécaniques étaient proportionnelles au manque d'activation du quadriceps ou à sa faiblesse. Ainsi, la prise en charge en rééducation par BFR pourrait améliorer ses altérations en agissant directement sur

le quadriceps (Pairot de Fontenay et al., 2019 ; Perraton et al., 2018). Cependant, il nous est impossible de conclure à propos de l'impact de la rééducation avec BFR sur la réaction du patient à un programme de RTR. Il se peut que notre protocole soit défaillant :

- Le BFR est utilisé puisqu'il permet de diminuer les charges et donc le stress mécanique sur l'articulation. Ce stress sera pourtant retrouvé au moment du RTR. Ainsi, la rééducation avec BFR pourrait permettre d'avoir un genou musclé et stable mais qui n'est pas habitué et prêt à recevoir des contraintes importantes car il n'y a pas été préparé. Il pourrait réagir avec des phénomènes inflammatoires ou de la douleur par exemple lors de cette réintroduction.

- Les exercices proposés dans le protocole sont souvent des exercices qui ciblent les deux jambes et donc n'imposent possiblement pas assez de charge sur le membre atteint afin de le préparer aux charges subies lors d'une course avec l'appui unipodal répété. De plus, il pourrait y avoir des compensations au cours de ces exercices qui entraîneraient une sous-utilisation du côté souhaité.

- Il faudrait que les articulations soient mises sous contraintes avec un tempo plus rapide car le BFR a un mécanisme de tempo lent (2s montée, 2s de descente).

En revanche, notons que des éléments sont en faveur de notre protocole avec BFR. Le programme de reprise de course proposé, inspiré de La Clinique Du Coureur et de l'étude de Pairot de Fontenay et al. (2022) est plutôt léger, très progressif et n'impose pas une charge excessive sur le genou trop rapidement. Ceci pourrait permettre d'avoir des résultats encourageants dans l'étude. De plus, les muscles qui développent les charges maximales les plus élevées pendant la course normale à vitesse modérée sont surtout les mollets et les quadriceps (Dorn et al., 2012). Malheureusement, un déficit de force important est généralement présent au moment du RTR. Or, notre protocole vise ses muscles et dans la littérature, le BFR a montré une amélioration de force du quadriceps. Ainsi, le fait de renforcer les muscles les plus sollicités lors de la course pourrait permettre au genou de mieux supporter les contraintes imposées par cette activité. Il est cependant impossible de prédire si cette amélioration sera suffisante pour compenser le déficit initial.

En analysant le protocole de RTR de Pairot de Fontenay et al. (2022) que nous utilisons dans cette étude, nous retenons plusieurs éléments. Sur les 34 participants, 18 ont réalisés 10 séances sur 2 semaines donc plus de la moitié des patients a pu réaliser le programme de course dans son intégralité. Cependant, 15 patients ont dû ralentir leur progression et, seul 3 ont atteints le niveau 10 du programme. Ce programme semble intéressant et pourrait permettre d'identifier des différences significatives.

Avec toutes les données de cette partie, nous posons l'hypothèse, qu'étant donné la rééducation complète et intensive que réaliseront les participants, ils devraient pouvoir atteindre la majorité des critères de reprise proposés. Nous pensons également que les résultats seront meilleurs dans le groupe BFR par rapport au groupe contrôle ce qui validerait l'une de nos hypothèses. Dans le cas où les résultats ne seraient pas significatifs statistiquement, nous nous intéresserons à la significativité clinique. Il se pourrait aussi, s'il n'y a pas de significativité, que des résultats optimaux soient liés à un protocole de rééducation accélérée et intensive et pas forcément à l'utilisation du BFR. En ce qui concerne l'impact du BFR sur l'aspect psychologique et la réalisation de la reprise de course, il nous est impossible de conclure mais des éléments dans la littérature nous permettent de supposer qu'un impact positif sur la force et la fonction subjective du genou pourrait se répercuter positivement sur le score ACL-RSI et la réintroduction de la course et ainsi valider nos hypothèses initiales.

3.4. Forces

L'une des forces de notre étude est son caractère complet. Tout d'abord, nous proposons une évaluation complète du processus de RTR avec une vision globale physique et psychologique du sujet. Nous proposons également une rééducation complète et adaptée aux recommandations suite à une reconstruction du LCA tout en appliquant le BFR dans le respect des recommandations de la littérature actuelle. (*Annexe 43*) Une autre force de notre étude est de s'intéresser aussi à la réalisation pratique du RTR et pas seulement aux critères de reprise. Le protocole de réintroduction de reprise de la course est en accord avec la littérature et respecte les 10 critères proposés pour avoir un programme complet et adapté après une reconstruction du LCA (Van Cant et al., 2022). Diverses forces ont été évoquées plus tôt avec l'utilisation variée du BFR et l'application de divers stimuli musculaires par le biais d'exercices variés. Notre étude présente aussi l'avantage d'être facilement réalisable. En effet, la fréquence des atteintes du LCA nous permet de projeter que l'inclusion des patients sera réalisable malgré nos critères d'inclusion parfois stricts. Ces derniers permettent d'ailleurs d'avoir une population homogène qui limitera les biais mais pourrait aussi limiter l'extrapolation des éventuels résultats à des sportifs de plus gros niveau par exemple ou à des patients présentant des lésions associées. Une autre force selon nous, est que cette étude est en lien avec des thérapeutes libéraux ce qui permet une ouverture de l'étude à la pratique clinique.

Enfin, l'utilisation d'un protocole type clair et détaillé est une force puisqu'elle permet, malgré une intervention de plusieurs thérapeutes, d'avoir une standardisation dans la rééducation proposée à nos participants et ainsi limiter les biais.

3.5. Limites

Notre étude présente également plusieurs limites. Tout d'abord, de nombreuses forces évoquées précédemment peuvent aussi entraîner des limites. Par exemple, le nombre de séances avant accord préalable est de 40 pour la rééducation du LCA (Ameli, 2021). Ainsi, avec notre rééducation intensive, nous pouvons nous demander dans quelle mesure les résultats seront généralisables d'un point de vue clinique, en termes de législation mais aussi pour les patients avec la nécessité de venir 4 fois par semaine en séances au cabinet. Une mise en place au sein d'un centre de rééducation ou d'une clinique aurait pu être envisageable.

La principale limite est notre vision globale du patient au moment du RTR. En effet, nos évaluations à 14 semaines sont très nombreuses, tout comme nos critères de jugement. Ceci pourrait rendre difficile la compréhension globale du protocole mais aussi l'analyse et la validité des éventuels résultats mis en lumière. De même, le choix d'un nombre aussi importants de critères pour autoriser le RTR pourrait limiter le nombre de patients accédant au RTR et ainsi impacter nos résultats avec peu de participants atteignant la réalisation pratique du RTR. Malgré tout, il nous semblait essentiel de prendre en considération le patient dans l'ensemble des dimensions pouvant impacter la réussite de son RTR et assurer la sécurité de ce retour.

Étant donné que de nombreuses recherches ont déjà étudié les effets du BFR sur les critères physiques, nous aurions pu modifier notre approche pour cette étude. Par exemple, comme dans le mémoire similaire (Jaffredo, 2020), en utilisant la batterie de test de Rambaud et al. (2018) comme critère de sortie de l'étude à 14 semaines, permettant seulement à un certain nombre de participants de réaliser les évaluations suivantes, qui auraient été à visée purement psychologique/subjective (IKDC/ACL-RSI) et pratique (réalisation du RTR). Par ce principe, nous aurions pu exclure les patients qui n'étaient pas jugés « prêts » physiquement et se concentrer sur l'évaluation des critères qui nous intéressent le plus, sans pour autant prendre de risque. Le protocole type proposé est intéressant pour l'homogénéité mais il n'est pas forcément adapté à la réalité clinique puisque tous les patients ne réagissent pas de la même façon aux séances et il est parfois nécessaire d'adapter certaines des séances.

Une autre limite évoquée plus tôt est l'absence d'évaluations intermédiaires dans notre étude. En effet, nous ne disposons que des données des patients à 14 semaines. Il aurait pu être intéressant de réaliser une évaluation initiale et/ou des évaluations intermédiaires pour avoir un suivi précis des évolutions des patients en fonction de leur groupe. Ceci aurait également permis une analyse en lien avec les scores de différence clinique minimale significative pour observer si les effets rencontrés sont cliniquement utiles. Nous avons

considéré que l'étude en question était déjà conséquente et que l'ajout d'évaluations et de visites supplémentaires auraient rendu le protocole trop complexe.

En termes d'inclusion, plusieurs de nos choix peuvent entraîner un biais. Nous avons décidé d'inclure des patients avec différents types de greffons pour la reconstruction. Pourtant, plusieurs études ont démontré des taux de déficits musculaires mais aussi de RTP différents en fonction des greffons utilisés (Brinlee et al., 2018 ; Mouarbes et al., 2019 ; Lepley et al., 2015). Plus simplement, nous pouvons ajouter qu'il existe une morbidité post-opératoire plus importante au niveau du site de greffe qui pourrait ainsi expliquer des retards de force spécifiques à ces muscles et une non-atteinte des critères nécessaires sur le muscle concerné au score LSI à 3 mois. Malgré tout, il n'y aurait pas de déficit de force et de différence dans le taux de RTP à 6 mois en fonction des différents greffons (Tscholl et al., 2017).

Nous avons aussi décidé de ne pas inclure la réalisation d'une rééducation préopératoire comme critère d'inclusion à l'étude. Pourtant, ceci pourrait impacter nos résultats car une étude a montré que les patients avec rééducation préopératoire avaient de meilleurs résultats post-opératoires au score IKDC (Jenkins et al., 2022). De même, une autre étude de Martini et al. (2022) a montré que les athlètes ayant de meilleurs scores ACL-RSI étaient plus souvent des jeunes, ayant reçu une rééducation préopératoire et avaient moins de douleur et d'épanchement post-opératoire. Dans la même idée, une étude (Giesche et al., 2020) avance que la rééducation préopératoire favorise le rétablissement de la stabilité mécanique et de la confiance des patients dans la stabilité de leur genou. Cependant, une revue de littérature récente a démontré que le niveau de preuve scientifique de la rééducation préopératoire était faible et incomplet pour l'impact sur les critères post-opératoires (Potts et al., 2022). Malgré tous ses éléments, nous avons choisi de ne pas réaliser de rééducation préopératoire, qui aurait rendu complexe une étude déjà conséquente. Ceci est compensé par le fait que nous utilisons ce critère pour notre randomisation stratifiée, ce qui équilibre ces données entre les groupes et limitera les biais dans les résultats.

Notons aussi que le coût de ce genre de dispositif est plutôt élevé (de l'ordre de 7000€ pour une machine Mad-Up®) malgré les possibilités que ce dispositif offre et les preuves qui demandent, certes, encore des certifications mais qui sont plutôt encourageantes sur ses différents impacts positifs sur diverses populations. Cela pourrait limiter le nombre de cabinets libéraux pouvant participer à l'étude et être un frein. Nous aurions pu ainsi généraliser l'étude à d'autres systèmes de BFR avec les dispositifs manuels, moins coûteux mais aussi moins reproductibles et fiables. Le reste du matériel nécessaire dans les cabinets libéraux de notre étude est assez conséquent mais correspond à du matériel plutôt classique d'un cabinet.

Différents biais existent aussi dans notre étude. Tout d'abord, le fait que l'étude soit en simple aveugle implique que les patients connaîtront leur groupe d'attribution ce qui pourrait créer un effet placebo. Des études précédentes avaient utilisées la méthode du « *BFR SHAM* », qui consiste en l'application du brassard à des pressions minimales, dans les groupes contrôles pour limiter ce biais, mais cela nous a paru complexe à mettre en place (Erickson et al., 2019). Le fait que les patients réalisent leur rééducation dans divers centres de kinésithérapie entraîne un biais d'homogénéité, c'est la raison pour laquelle nous avons proposé un protocole type à mettre en place permettant de limiter cet impact. Il y a aussi le fait que le nombre de patients à inclure ne soit basé que sur une analyse d'autres études de la littérature. Ceci peut être une limite car les critères de jugement principaux étudiés ne sont pas les mêmes et la puissance de l'étude pourrait ainsi ne pas être suffisante.

En résumé, notre étude permet une prise en compte globale du patient au moment du RTR, ce qui entraîne un nombre important de critères de jugement pouvant limiter la compréhension et la validité de nos résultats. De même, nous voulions nous intéresser au ressenti des patients et ainsi plusieurs critères de jugement subjectifs sont présents dans notre analyse. Pour continuer sur cet aspect subjectif, abordons rapidement les charges utilisées. Il nous a paru difficile, au vu du nombre d'exercices proposés d'utiliser le 1RM. C'est ainsi que nous avons décidé d'utiliser le système de RPE, qui a prouvé son efficacité mais qui reste une évaluation subjective. De plus, comme nous l'avons évoqué plus tôt, l'utilisation du BFR entraîne une sensation d'effort perçue plus importante. Ceci pourrait permettre de représenter le schéma fréquent dans la littérature du BFR avec une groupe contrôle à 70% 1RM et le groupe BFR à 30% 1RM.

Enfin, d'un point de vue clinique, une utilisation personnelle du BFR associé à l'exercice nous a permis de mettre en avant le fait que cette technique n'est pas agréable en terme de ressenti ce qui pourrait créer une limite à l'adhésion de certains patients (Mok et al., 2020).

3.6. Perspectives

3.6.1. Cliniques

Notre étude, en fonction des résultats, pourrait permettre de mettre en lumière de nouvelles perspectives dans la rééducation précoce du LCA associée à l'exercice avec BFR. Ce dernier est un outil qui pourrait devenir de plus en plus important dans la pratique clinique post-opératoire des thérapeutes. De même, ce type d'intervention pourrait devenir un moyen pour les patients d'optimiser leur rééducation et de pouvoir limiter l'impact fonctionnel et psychologique de cette pathologie. Il serait en effet intéressant de trouver des moyens

efficaces afin de prendre en charge l'aspect psychologique autour de l'après ACLR. Une étude récente de Conley et al. (2023) a démontré qu'au moins 10% des patients développent des symptômes dépressifs ou d'anxiété après la reconstruction du LCA.

3.6.2. Pour la recherche

Si nos résultats étaient probants, il deviendrait alors judicieux de poursuivre ces recherches avec des études moins globales et plus spécialisées. Par exemple, une étude avec évaluation qualitative de la course après une rééducation avec BFR ou encore une étude s'intéressant aux perceptions psychologiques des patients lors du retour à l'activité. Ceci pourrait se réaliser par le biais de questionnaires comme dans notre étude. Nous avons constaté que le score IKDC n'était peut-être pas assez adapté pour répondre aux critères psychologiques. En effet, il évalue la fonction du genou perçue par le patient dans ses activités et ainsi indirectement la notion de confiance en ce dernier mais ce n'est pas son objectif principal. Au contraire, le score ACL-RSI est lui créé pour évaluer la préparation psychologique des patients. Cependant, il ne nous semble pas forcément adapté à la phase du retour à la course dans la mesure où la majorité des questions posées aux patients sont orientées sur la pratique sportive du patient qui est souvent bien plus exigeante que la course. Ainsi, les futures études devraient s'intéresser à l'utilisation d'autres outils avec la création de nouveaux questionnaires adaptés aux phases plus précoces ou l'utilisation de scores de kinésiophobie qui sont assez répandus dans la littérature (Tampa Scale of Kinesophobia). Cette dernière a été définie comme la peur déraisonnable ou irrationnelle de la douleur et le fait de se blesser à nouveau lors d'un mouvement physique (Kori et al., 1990 ; Norte et al., 2019). L'étude de Norte et al. (2019) a mis en lumière que des scores élevés de kinésiophobie étaient associés à une faiblesse des IJ, des scores subjectifs moins importants et de moins bonnes performances fonctionnelles au saut après ACLR.

Enfin, notre étude, si elle était concluante, pourrait permettre d'envisager des résultats à plus long terme sur le processus de RTP. En effet, il a été prouvé que des scores faibles de fonction subjective à 6/12 mois post-chirurgie étaient associés négativement à la batterie de test de RTP. Inversement, des scores normaux de fonction subjective n'étaient pas corrélés à une meilleure réussite à la batterie de test de RTP (Logerstedt et al., 2014). Nous nous sommes intéressés ici aux phases précoces du processus et des résultats positifs pourraient permettre d'envisager une projection à plus long terme avec notamment un impact de ce type de rééducation sur les taux de RTP ou le taux de récurrence par exemple.

4. CONCLUSION

L'objectif principal était d'observer l'impact d'une rééducation intense et précoce avec BFR sur le processus de reprise de course après ACLR chez des participants jeunes et sportifs. La non mise en place de notre protocole ainsi que l'absence de données scientifiques associant BFR et RTR ne nous permettent pas de conclure sur nos hypothèses. Cependant, l'analyse de la littérature sur le BFR nous a permis d'objectiver son impact positif sur une grande partie des critères évoqués pour autoriser le retour à la course. De même, plusieurs études ont montré l'intérêt du BFR pour améliorer le score IKDC des patients, qui a lui-même prouvé son intérêt pour prédire la réussite de la réintroduction de course chez des patients après reconstruction du LCA.

Ainsi, la réalisation de cette étude pourrait mettre en lumière l'intérêt de l'utilisation précoce et variée du BFR dans une rééducation intensive post-opératoire du LCA. Cela pourrait mettre en perspective l'intérêt de cette technique en clinique pour améliorer le ressenti, la fonction réelle et subjective mais aussi optimiser les diverses étapes fonctionnelles. Egalement, la vision à plus long terme avec l'évaluation des taux de RTP serait intéressante.

Enfin, un autre objectif de notre étude était d'observer si la rééducation avec BFR pouvait avoir un impact sur l'aspect psychologique avec l'appréhension et la confiance. Malheureusement, nous n'avons pas pu conclure mais nous avons mis en avant le questionnement et les données actuelles sur le sujet. Une étude future serait intéressante pour évaluer cette notion en élargissant avec l'intégration du concept de kinésiophobie par exemple.

Bibliographie

- Abbas, M. J., Dancy, M. E., Marigi, E. M., Khalil, L. S., Jildeh, T. R., Buckley, P. J., Gillett, J., Burgos, W., & Okoroha, K. R. (2022). An Automated Technique for the Measurement of Limb Occlusion Pressure During Blood Flow Restriction Therapy Is Equivalent to Previous Gold Standard. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(3), e1127-e1132. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2022.04.002>
- Abe, T., Beekley, M., Hinata, S., Koizumi, K., & Sato, Y. (2005). Day-to-day change in muscle strength and MRI-measured skeletal muscle size during 7 days KAATSU resistance training : A case study. *International Journal of Kaatsu Training Research*, 1, 71-76. <https://doi.org/10.3806/ijktr.1.71>
- Abe, T., Fujita, S., Nakajima, T., Sakamaki, M., Ozaki, H., Ogasawara, R., Sugaya, M., Kudo, M., Kurano, M., Yasuda, T., Sato, Y., Ohshima, H., Mukai, C., & Ishii, N. (2010). Effects of Low-Intensity Cycle Training with Restricted Leg Blood Flow on Thigh Muscle Volume and VO2MAX in Young Men. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(3), 452-458.
- Abe, T., Kawamoto, K., Yasuda, T., Kearns, C. F., Midorikawa, T., & Sato, Y. (2005). Eight days KAATSU-resistance training improved sprint but not jump performance in collegiate male track and field athletes. *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(1), 19-23. <https://doi.org/10.3806/ijktr.1.19>
- Accueil KAATSU France. (s. d.). Consulté 14 septembre 2023, à l'adresse <https://www.kaatsu-france.com/>
- Allard, P., Dalleau, G., Begon, M., & Blanchi, J. P. (2011). *Analyse du mouvement humain par la biomécanique: Vol. Tome 0*. <https://www.fnac.com/a4026101/Paul-Allard-Analyse-du-mouvement-humain-par-la-biomecanique>
- Ameli. (2021). *Accord préalable et actes de masso-kinésithérapie*. <https://www.ameli.fr/medecin/exercice-liberal/accord-prealable/accord-prealable-actes-masso-kinesitherapie>

- American College of Sports Medicine. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(3), 687-708. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181915670>
- Andrade, R., Pereira, R., van Cingel, R., Staal, J. B., & Espregueira-Mendes, J. (2020). How should clinicians rehabilitate patients after ACL reconstruction? A systematic review of clinical practice guidelines (CPGs) with a focus on quality appraisal (AGREE II). *British Journal of Sports Medicine*, 54(9), 512-519. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100310>
- Ardern, C. L., Kvist, J., & Webster, K. E. (2016). Psychological Aspects of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Operative Techniques in Sports Medicine*, 24(1), 77-83. <https://doi.org/10.1053/j.otsm.2015.09.006>
- Ardern, C. L., Österberg, A., Tagesson, S., Gauffin, H., Webster, K. E., & Kvist, J. (2014). The impact of psychological readiness to return to sport and recreational activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *British Journal of Sports Medicine*, 48(22), 1613-1619. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093842>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2014). Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: An updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *British Journal of Sports Medicine*, 48(21), 1543-1552. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093398>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., Whitehead, T. S., & Webster, K. E. (2013). Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(7), 1549-1558. <https://doi.org/10.1177/0363546513489284>
- Ardern, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2011). Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: A systematic review and meta-analysis of the state of play. *British Journal of Sports Medicine*, 45(7), 596-606. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.076364>

Arrêté du 12 avril 2018 fixant la liste des recherches mentionnées au 3° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique.

Australian Sports Commission. (2021). *Blood flow restriction training guidelines*. Australian Sports Commission. https://www.ais.gov.au/position_statements/best_practice_content/blood-flow-restriction-training-guidelines

Bartolomei, S., Montesanto, P., Lanzoni, I. M., Gatta, G., Cortesi, M., & Fantozzi, S. (2022). A Comparison between High and Low Cuff Pressures on Muscle Oxygen Saturation and Recovery Responses Following Blood-Flow Restriction Resistance Exercise. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(23), 9138. <https://doi.org/10.3390/s22239138>

Bennett, H., & Slattery, F. (2019). Effects of Blood Flow Restriction Training on Aerobic Capacity and Performance : A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(2), 572-583. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002963>

Bielitzki, R., Behrendt, T., Behrens, M., & Schega, L. (2021). Current Techniques Used for Practical Blood Flow Restriction Training : A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(10), 2936-2951. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004104>

Bohu, Y., Klouche, S., Lefevre, N., Webster, K., & Herman, S. (2015). Translation, cross-cultural adaptation and validation of the French version of the Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) scale. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 23(4), 1192-1196. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-2942-4>

Boisrenoult, P., Noailles, T., Steltzen, C., Beaufile, P., & Pujol, N. (2015). Anatomie moderne du ligament croisé antérieur – un seul faisceau plat torsadé. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 101(7, Supplement), S250-S251. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2015.09.268>

Borg, G. a. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377.

Bowman, E. N., Elshaar, R., Milligan, H., Jue, G., Mohr, K., Brown, P., Watanabe, D. M., & Limpisvasti, O. (2019). Proximal, Distal, and Contralateral Effects of Blood Flow Restriction Training on the Lower Extremities : A Randomized Controlled Trial. *Sports Health*, 11(2), 149-156. <https://doi.org/10.1177/1941738118821929>

- Brinlee, A. W., Dickenson, S. B., Hunter-Giordano, A., & Snyder-Mackler, L. (2022). ACL Reconstruction Rehabilitation : Clinical Data, Biologic Healing, and Criterion-Based Milestones to Inform a Return-to-Sport Guideline. *Sports Health*, 14(5), 770-779. <https://doi.org/10.1177/19417381211056873>
- Buckthorpe, M., & Della Villa, F. (2020). Optimising the « Mid-Stage » Training and Testing Process After ACL Reconstruction. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 50(4), 657-678. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01222-6>
- Buckthorpe, M., Gokeler, A., Herrington, L., Hughes, M., Grassi, A., Wadey, R., Patterson, S., Compagnin, A., La Rosa, G., & Della Villa, F. (2024). Optimising the Early-Stage Rehabilitation Process Post-ACL Reconstruction. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 54(1), 49-72. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01934-w>
- Camic, C. L., Kovacs, A. J., Enquist, E. A., McLain, T. A., & Hill, E. C. (2015). Muscle activation of the quadriceps and hamstrings during incremental running. *Muscle & Nerve*, 52(6), 1023-1029. <https://doi.org/10.1002/mus.24901>
- Cavanagh, P. R., & LaFortune, M. A. (1980). Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13(5), 397-406. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(80\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0021-9290(80)90033-0)
- Chamorro, C., Armijo-Olivo, S., De la Fuente, C., Fuentes, J., & Javier Chiroso, L. (2017). Absolute Reliability and Concurrent Validity of Hand Held Dynamometry and Isokinetic Dynamometry in the Hip, Knee and Ankle Joint: Systematic Review and Meta-analysis. *Open Medicine (Warsaw, Poland)*, 12, 359-375. <https://doi.org/10.1515/med-2017-0052>
- Charles, D., White, R., Reyes, C., & Palmer, D. (2020). A SYSTEMATIC REVIEW OF THE EFFECTS OF BLOOD FLOW RESTRICTION TRAINING ON QUADRICEPS MUSCLE ATROPHY AND CIRCUMFERENCE POST ACL RECONSTRUCTION. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 15(6), 882-891. <https://doi.org/10.26603/ijsp20200882>
- Chen, M. J., Fan, X., & Moe, S. T. (2002). Criterion-related validity of the Borg ratings of perceived exertion scale in healthy individuals : A meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 20(11), 873-899. <https://doi.org/10.1080/026404102320761787>

- Chmielewski et al. (2002). *Changes in weight-bearing following injury or surgical reconstruction of the ACL: relationship to quadriceps strength and function—PubMed*.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12127191/>
- Christino, M. A., Fleming, B. C., Machan, J. T., & Shalvoy, R. M. (2016). Psychological Factors Associated With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Recovery. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 4(3), 2325967116638341. <https://doi.org/10.1177/2325967116638341>
- Claes, S., Verdonk, P., Forsyth, R., & Bellemans, J. (2011). The « ligamentization » process in anterior cruciate ligament reconstruction : What happens to the human graft? A systematic review of the literature. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(11), 2476-2483.
<https://doi.org/10.1177/0363546511402662>
- Clark, B. C., Manini, T. M., Hoffman, R. L., Williams, P. S., Guiler, M. K., Knutson, M. J., McGlynn, M. L., & Kushnick, M. R. (2011). Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(5), 653-662. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01100.x>
- CNIL. (2018). *Recherches dans le domaine de la santé avec recueil du consentement*.
<https://www.cnil.fr/fr/declaration/mr-001-recherches-dans-le-domaine-de-la-sante-avec-recueil-du-consentement>
- CNIL. (2020). *La CNIL publie trois référentiels pour le secteur de la santé*. <https://www.cnil.fr/fr/la-cnil-publie-trois-referentiels-pour-le-secteur-de-la-sante>
- Cognetti, D. J., Sheean, A. J., & Owens, J. G. (2022). Blood Flow Restriction Therapy and Its Use for Rehabilitation and Return to Sport: Physiology, Application, and Guidelines for Implementation. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(1), e71-e76.
<https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.025>
- Colapietro, M., Portnoff, B., Miller, S. J., Sebastianelli, W., & Vairo, G. L. (2023). Effects of Blood Flow Restriction Training on Clinical Outcomes for Patients With ACL Reconstruction : A Systematic Review. *Sports Health*, 15(2), 260-273.
<https://doi.org/10.1177/19417381211070834>

- Conley, C. W., Stone, A. V., Hawk, G. S., Thompson, K. L., Ireland, M. L., Johnson, D. L., Noehren, B. W., & Jacobs, C. A. (2023). Prevalence and Predictors of Postoperative Depression and Anxiety After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Cureus*, *15*(9), e45714. <https://doi.org/10.7759/cureus.45714>
- Cooper, R., & Hugues, M. (2019). Melbourne ACL Rehabilitation Guide. *Team ACL*. <https://team-acl.com/melbourne-acl-rehabilitation-guide/>
- Coquard, M., Carrozzo, A., Saithna, A., Vigne, G., Le Guen, M., Fournier, Y., Hager, J.-P., Vieira, T. D., & Sonnery-Cottet, B. (2022). Anterolateral Ligament Reconstruction Does Not Delay Functional Recovery, Rehabilitation, and Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Matched-Pair Analysis From the SANTI (Scientific ACL Network International) Study Group. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, *4*(1), e9-e16. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.026>
- Corvino, R. B., Oliveira, M. F. M. de, Santos, R. P. dos, Denadai, B. S., & Caputo, F. (2014). Four weeks of blood flow restricted training increases time to exhaustion at severe intensity cycling exercise. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*, *16*, 570-578. <https://doi.org/10.5007/1980-0037.2014v16n5p570>
- Coyle, E. F., Martin, W. H., Sinacore, D. R., Joyner, M. J., Hagberg, J. M., & Holloszy, J. O. (1984). Time course of loss of adaptations after stopping prolonged intense endurance training. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, *57*(6), 1857-1864. <https://doi.org/10.1152/jappl.1984.57.6.1857>
- Culvenor, A. G., Girdwood, M. A., Juhl, C. B., Patterson, B. E., Haberfield, M. J., Holm, P. M., Bricca, A., Whittaker, J. L., Roos, E. M., & Crossley, K. M. (2022). Rehabilitation after anterior cruciate ligament and meniscal injuries: A best-evidence synthesis of systematic reviews for the OPTIKNEE consensus. *British Journal of Sports Medicine*, *56*(24), 1445-1453. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-105495>
- Curran, M. T., Bedi, A., Mendias, C. L., Wojtys, E. M., Kujawa, M. V., & Palmieri-Smith, R. M. (2020). Blood Flow Restriction Training Applied With High-Intensity Exercise Does Not Improve Quadriceps Muscle Function After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized

Controlled Trial. *The American Journal of Sports Medicine*, 48(4), 825-837.
<https://doi.org/10.1177/0363546520904008>

Cuyul-Vásquez, I., Leiva-Sepúlveda, A., Catalán-Medalla, O., Araya-Quintanilla, F., & Gutiérrez-Espinoza, H. (2020). The addition of blood flow restriction to resistance exercise in individuals with knee pain : A systematic review and meta-analysis. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 24(6), 465-478. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2020.03.001>

Czuppon, S., Racette, B. A., Klein, S. E., & Harris-Hayes, M. (2014). Variables associated with return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction : A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 48(5), 356-364. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091786>

Dahduli, O. S., AlHossan, A. M., Al Rushud, M. A., Alneghaimshi, M. M., Alotaibi, S. F., AlNour, M. K., Al Otaibi, A. H., AlAseeri, A., & AlBatati, S. (2023). Early Surgical Reconstruction Versus Rehabilitation for Patients With Anterior Cruciate Ligament Rupture : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus*, 15(8), e43370. <https://doi.org/10.7759/cureus.43370>

Dauty, M., Menu, P., Daley, P., Grondin, J., Quinette, Y., Crenn, V., & Fouasson-Chailloux, A. (2022). Knee Strength Assessment and Clinical Evaluation Could Predict Return to Running after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Patellar Tendon Procedure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13396. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013396>

de Oliveira, M. F. M., Caputo, F., Corvino, R. B., & Denadai, B. S. (2016). Short-term low-intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(9), 1017-1025. <https://doi.org/10.1111/sms.12540>

Deones, V. L., Wiley, S. C., & Worrell, T. (1994). Assessment of quadriceps muscle performance by a hand-held dynamometer and an isokinetic dynamometer. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 20(6), 296-301. <https://doi.org/10.2519/jospt.1994.20.6.296>

de Queiros, V. S., de França, I. M., Trybulski, R., Vieira, J. G., dos Santos, I. K., Neto, G. R., Wilk, M., de Matos, D. G., Vieira, W. H. de B., Novaes, J. da S., Makar, P., Cabral, B. G. de A. T., & Dantas, P. M. S. (2021). Myoelectric Activity and Fatigue in Low-Load Resistance Exercise

With Different Pressure of Blood Flow Restriction : A Systematic Review and Meta-Analysis.

Frontiers in Physiology, 12, 786752. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.786752>

de Sa, D., Shanmugaraj, A., Weidman, M., Peterson, D. C., Simunovic, N., Musahl, V., & Ayeni, O. R. (2018). All-Inside Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-A Systematic Review of Techniques, Outcomes, and Complications. *The Journal of Knee Surgery*, 31(9), 895-904. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1627446>

Dorn, T. W., Schache, A. G., & Pandy, M. G. (2012). Muscular strategy shift in human running : Dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *The Journal of Experimental Biology*, 215(Pt 11), 1944-1956. <https://doi.org/10.1242/jeb.064527>

Dragicevic-Cvjetkovic, D., Jandric, S., Bijeljic, S., Palija, S., Manojlovic, S., & Talic, G. (2014). The Effects of Rehabilitation Protocol on Functional Recovery After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Medical Archives*, 68(5), 350-352. <https://doi.org/10.5455/medarh.2014.68.350-352>

Draper, V., & Ballard, L. (1991). Electrical stimulation versus electromyographic biofeedback in the recovery of quadriceps femoris muscle function following anterior cruciate ligament surgery. *Physical Therapy*, 71(6), 455-461; discussion 461-464. <https://doi.org/10.1093/ptj/71.6.455>

Drole, K., & Paravlic, A. H. (2022a). Interventions for increasing return to sport rates after an anterior cruciate ligament reconstruction surgery : A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 13, 939209. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.939209>

Dubljanin-Raspopović, E., Kadija, M., & Matanović, D. (2006). [Evaluation of the intensive rehabilitation protocol after arthroscopically assisted anterior cruciate ligament reconstruction]. *Srpski Arhiv Za Celokupno Lekarstvo*, 134(11-12), 532-536. <https://doi.org/10.2298/sarh0612532d>

Ebben, W. P., Feldmann, C. R., Dayne, A., Mitsche, D., Alexander, P., & Knetzger, K. J. (2009). Muscle activation during lower body resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 30(1), 1-8. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1038785>

Eitzen, I., Moksnes, H., Snyder-Mackler, L., & Risberg, M. A. (2010). A progressive 5-week exercise therapy program leads to significant improvement in knee function early after anterior cruciate

ligament injury. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 40(11), 705-721.

<https://doi.org/10.2519/jospt.2010.3345>

Erickson, L. N., Lucas, K. C. H., Davis, K. A., Jacobs, C. A., Thompson, K. L., Hardy, P. A., Andersen, A. H., Fry, C. S., & Noehren, B. W. (2019). Effect of Blood Flow Restriction Training on Quadriceps Muscle Strength, Morphology, Physiology, and Knee Biomechanics Before and After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : Protocol for a Randomized Clinical Trial. *Physical Therapy*, 99(8), 1010-1019. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzz062>

Feyzioglu, Ö., Öztürk, Ö., Sirmen, B., & Muğrabi, S. (2020). Does an Accelerated Program Give Equivalent Results in Both Elite Athletes and Nonathletes? *Journal of Sport Rehabilitation*, 29(5), 572-577. <https://doi.org/10.1123/jsr.2018-0346>

Filbay, S. R., Dowsett, M., Chaker Jomaa, M., Rooney, J., Sabharwal, R., Lucas, P., Van Den Heever, A., Kazaglis, J., Merlino, J., Moran, M., Allwright, M., Kuah, D. E. K., Durie, R., Roger, G., Cross, M., & Cross, T. (2023). Healing of acute anterior cruciate ligament rupture on MRI and outcomes following non-surgical management with the Cross Bracing Protocol. *British Journal of Sports Medicine*, 57(23), 1490-1497. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106931>

Filbay, S. R., & Grindem, H. (2019). Evidence-based recommendations for the management of anterior cruciate ligament (ACL) rupture. *Best Practice & Research. Clinical Rheumatology*, 33(1), 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2019.01.018>

Forelli, F., Barbar, W., Kersante, G., Vandebrouck, A., Duffiet, P., Ratte, L., Hewett, T. E., & Rambaud, A. J. M. (2023a). Evaluation of Muscle Strength and Graft Laxity With Early Open Kinetic Chain Exercise After ACL Reconstruction : A Cohort Study. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 11(6), 23259671231177594. <https://doi.org/10.1177/23259671231177594>

Forelli, F., Barbar, W., Kersante, G., Vandebrouck, A., Duffiet, P., Ratte, L., Hewett, T., & Rambaud, A. (2023b). *EARLY OPEN KINETIC CHAIN IMPROVES RETURN TO SPORT AFTER ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION.*

Forelli, F., Kersante, G., Vandebrouck, A., Duffiet, P., Ratte, L., & Rambaud, A. (2022). *EARLY OPEN KINETIC CHAIN ALLOWS BETTER MUSCLE STRENGTH RECOVERY AT TIME TO RETURN TO RUNNING AFTER ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION.*

- Forelli, F., Riera, J., Mazeas, J., Coulondre, C., Putnis, S., Neri, T., & Rambaud, A. (2023). Ligament Healing After Anterior Cruciate Ligament Rupture: An Important New Patient Pathway? *International Journal of Sports Physical Therapy*, 18(5), 1032-1035. <https://doi.org/10.26603/001c.88250>
- Fremerey, R. W., Lobenhoffer, P., Zeichen, J., Skuttek, M., Bosch, U., & Tscherne, H. (2000). Proprioception after rehabilitation and reconstruction in knees with deficiency of the anterior cruciate ligament: A prospective, longitudinal study. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 82(6), 801-806. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.82b6.10306>
- Fry, C. S., Johnson, D. L., Ireland, M. L., & Noehren, B. (2017). ACL injury reduces satellite cell abundance and promotes fibrogenic cell expansion within skeletal muscle. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 35(9), 1876-1885. <https://doi.org/10.1002/jor.23502>
- Giesche, F., Niederer, D., Banzer, W., & Vogt, L. (2020). Evidence for the effects of prehabilitation before ACL-reconstruction on return to sport-related and self-reported knee function: A systematic review. *PloS One*, 15(10), e0240192. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240192>
- Glatcke, K. E., Tummala, S. V., & Chhabra, A. (2022). Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Recovery and Rehabilitation: A Systematic Review. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 104(8), 739-754. <https://doi.org/10.2106/JBJS.21.00688>
- Grapar Žargi, T., Drobnič, M., Vauhnik, R., Koder, J., & Kacin, A. (2017). Factors predicting quadriceps femoris muscle atrophy during the first 12weeks following anterior cruciate ligament reconstruction. *The Knee*, 24(2), 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.11.003>
- Grondin, J., Crenn, V., Gernigon, M., Quinette, Y., Louguet, B., Menu, P., Fouasson-Chailloux, A., & Dauty, M. (2022). Relevant Strength Parameters to Allow Return to Running after Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with Hamstring Tendon Autograft. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8245. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148245>

- Gupta, K., Attri, J., Singh, A., Kaur, H., & Kaur, G. (2016). Basic concepts for sample size calculation : Critical step for any clinical trials! *Saudi Journal of Anaesthesia*, 10(3), 328-331. <https://doi.org/10.4103/1658-354X.174918>
- Hanon, C. (2005). Activité musculaire des membres inférieurs en course à pied sur le plat. *Staps*, 68(2), 111-124. <https://doi.org/10.3917/sta.068.0111>
- Hassebrock, J. D., Gulbrandsen, M. T., Asprey, W. L., Makovicka, J. L., & Chhabra, A. (2020). Knee Ligament Anatomy and Biomechanics. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*, 28(3), 80-86. <https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000279>
- Haute Autorité de Santé. (2008). *Critères de suivi en rééducation et d'orientation en ambulatoire ou en soins de suite ou de réadaptation après ligamentoplastie du croisé antérieur du genou*. Haute Autorité de Santé. https://www.has-sante.fr/jcms/c_639105/fr/criteres-de-suivi-en-reeducation-et-d-orientation-en-ambulatoire-ou-en-soins-de-suite-ou-de-readaptation-apres-ligamentoplastie-du-croise-anterieur-du-genou
- Haute Autorité de Santé. (2012). *Haute Autorité de Santé—LARS, ligament artificiel du genou*. Haute Autorité de Santé. https://www.has-sante.fr/jcms/c_1350091/fr/lars-ligament-artificiel-du-genou
- Head, P., Waldron, M., Theis, N., & Patterson, S. D. (2020). Acute Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) With Blood Flow Restriction : The Effect of Restriction Pressures. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(3), 375-383. <https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0505>
- Hedt, C., McCulloch, P. C., Harris, J. D., & Lambert, B. S. (2022). Blood Flow Restriction Enhances Rehabilitation and Return to Sport : The Paradox of Proximal Performance. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(1), e51-e63. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.024>
- Higgins, L. D., Taylor, M. K., Park, D., Ghodadra, N., Marchant, M., Pietrobon, R., & Cook, C. (2007). Reliability and validity of the International Knee Documentation Committee (IKDC) Subjective Knee Form. *Joint Bone Spine*, 74(6), 594-599. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2007.01.036>

- Hirano, M., Katoh, M., Gomi, M., & Arai, S. (2020). Validity and reliability of isometric knee extension muscle strength measurements using a belt-stabilized hand-held dynamometer: A comparison with the measurement using an isokinetic dynamometer in a sitting posture. *Journal of Physical Therapy Science*, 32(2), 120-124. <https://doi.org/10.1589/jpts.32.120>
- Hornikel, B., Saffold, K. S., Esco, M. R., Mota, J. A., Fedewa, M. V., Wind, S. A., Adams, T. L., & Winchester, L. J. (2023). Acute Responses to High-Intensity Back Squats with Bilateral Blood Flow Restriction. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3555. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043555>
- <https://www.neuroxtrain.com/article/70582/>. (s. d.).
- Hughes, L., Paton, B., Haddad, F., Rosenblatt, B., Gissane, C., & Patterson, S. D. (2018). 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. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 33, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2018.07.002>
- Hughes, L., Paton, B., Rosenblatt, B., Gissane, C., & Patterson, S. D. (2017). Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 51(13), 1003-1011. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097071>
- Hughes, L., Patterson, S. D., Haddad, F., Rosenblatt, B., Gissane, C., McCarthy, D., Clarke, T., Ferris, G., Dawes, J., & Paton, B. (2019). 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. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 39, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.06.014>
- Hughes, L., Rosenblatt, B., Haddad, F., Gissane, C., McCarthy, D., Clarke, T., Ferris, G., Dawes, J., Paton, B., & Patterson, S. D. (2019). Comparing the Effectiveness of Blood Flow Restriction and Traditional Heavy Load Resistance Training in the Post-Surgery Rehabilitation of Anterior

Cruciate Ligament Reconstruction Patients: A UK National Health Service Randomised Controlled Trial. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(11), 1787-1805.
<https://doi.org/10.1007/s40279-019-01137-2>

La Clinique du coureur. (2022). *Evaluation de la course après reconstruction du LCA - Benoit Pairot de Fontenay*. La Clinique Du Coureur. Consulté 7 février 2024, à l'adresse
<https://lacliniqueducoureur.com/pages/evaluation-de-la-course-apre-s-reconstruction-du-lca-benoit-pairot-de-fontenay-video/>

INSERM PRO. (2022, mai 23). Démarches règlementaires RIPH. *Inserm pro*.
[https://pro.inserm.fr/search/Démarches règlementaires RIPH](https://pro.inserm.fr/search/Démarches_réglementaires_RIPH)

Iversen, E., Røstad, V., & Larmo, A. (2016). Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 115-118. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.12.005>

Jaffredo, F. (2020). *Intérêt du Blood Flow Restriction sur la reprise de course à pied après une reconstruction du LCA : Revue de littérature et protocole*. 103.

Jenkins, S. M., Guzman, A., Gardner, B. B., Bryant, S. A., Del Sol, S. R., McGahan, P., & Chen, J. (2022). Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Injury: Review of Current Literature and Recommendations. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 15(3), 170-179.
<https://doi.org/10.1007/s12178-022-09752-9>

Kaeding, C. C., Léger-St-Jean, B., & Magnussen, R. A. (2017). Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clinics in Sports Medicine*, 36(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.csm.2016.08.001>

Kamina, P. (2009). *Kamina Anatomie Tome 1 : Anatomie Clinique de Kamina Tome 1 - Anatomie Clinique Tome 1, Anatomie Générale, Membre de Pierre Kamina (4e éd.)*. MALOINE.
<https://www.livres-medicaux.com/etudiants-medecine/1679-kamina-anatomie-clinique-4-edition-tome-1-anatomie-generale-membres.html>

Kanakamedala, A. C., Anderson, A. F., & Irrgang, J. J. (2016). IKDC Subjective Knee Form and Marx Activity Rating Scale are suitable to evaluate all orthopaedic sports medicine knee

conditions : A systematic review. *Journal of ISAKOS*, 1(1), 25-31.

<https://doi.org/10.1136/jisakos-2015-000014>

Kapandji, A. I. (2021). *Anatomie fonctionnelle, vol. 2 : Membre inférieur*. MALOINE.

Kaur, M., Ribeiro, D. C., Theis, J.-C., Webster, K. E., & Sole, G. (2016). Movement Patterns of the Knee During Gait Following ACL Reconstruction : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(12), 1869-1895. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0510-4>

Ke, J., Zhou, X., Yang, Y., Shen, H., Luo, X., Liu, H., Gao, L., He, X., & Zhang, X. (2022). Blood flow restriction training promotes functional recovery of knee joint in patients after arthroscopic partial meniscectomy : A randomized clinical trial. *Frontiers in Physiology*, 13, 1015853. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1015853>

Kelln, B. M., McKeon, P. O., Gontkof, L. M., & Hertel, J. (2008). Hand-held dynamometry : Reliability of lower extremity muscle testing in healthy, physically active, young adults. *Journal of Sport Rehabilitation*, 17(2), 160-170. <https://doi.org/10.1123/jsr.17.2.160>

Kilgas, M. A., Lytle, L. L. M., Drum, S. N., & Elmer, S. J. (2019). Exercise with Blood Flow Restriction to Improve Quadriceps Function Long After ACL Reconstruction. *International Journal of Sports Medicine*, 40(10), 650-656. <https://doi.org/10.1055/a-0961-1434>

Kinesport. (s. d.). *SINGLE LEG SQUAT ET RECONSTRUCTION DU LCA*. Kinesport. Consulté 10 mars 2024, à l'adresse <https://www.kinesport.fr/blog/single-leg-squat>

Knurr, K. A., Kliethermes, S. A., Stiffler-Joachim, M. R., Cobian, D. G., Baer, G. S., & Heiderscheit, B. C. (2021). Running Biomechanics Before Injury and 1 Year After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Division I Collegiate Athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 49(10), 2607-2614. <https://doi.org/10.1177/03635465211026665>

Kotsifaki, R., Korakakis, V., King, E., Barbosa, O., Maree, D., Pantouveris, M., Bjerregaard, A., Luomajoki, J., Wilhelmsen, J., & Whiteley, R. (2023). Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *British Journal of Sports Medicine*, 57(9), 500-514. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106158>

- Krause, M., Freudenthaler, F., Frosch, K.-H., Achtnich, A., Petersen, W., & Akoto, R. (2018). Operative Versus Conservative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Rupture. *Deutsches Arzteblatt International*, 115(51-52), 855-862. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2018.0855>
- Kyritsis, P., Bahr, R., Landreau, P., Miladi, R., & Witvrouw, E. (2016). Likelihood of ACL graft rupture : Not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *British Journal of Sports Medicine*, 50(15), 946-951. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095908>
- La, A., Nadarajah, V., Jauregui, J. J., Shield, W. P., Medina, S. H., Dubina, A. G., Meredith, S. J., Packer, J. D., & Henn, R. F. (2020). Clinical characteristics associated with depression or anxiety among patients presenting for knee surgery. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 11(Suppl 1), S164-S170. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2019.08.009>
- Lamb, K. L., Eston, R. G., & Corns, D. (1999). Reliability of ratings of perceived exertion during progressive treadmill exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 33(5), 336-339.
- Loenneke, J. P., Abe, T., Wilson, J. M., Thiebaud, R. S., Fahs, C. A., Rossow, L. M., & Bembem, M. G. (2012). Blood flow restriction: An evidence based progressive model (Review). *Acta Physiologica Hungarica*, 99(3), 235-250. <https://doi.org/10.1556/APhysiol.99.2012.3.1>
- Loenneke, J. P., Wilson, J. M., Marín, P. J., Zourdos, M. C., & Bembem, M. G. (2012). Low intensity blood flow restriction training : A meta-analysis. *European Journal of Applied Physiology*, 112(5), 1849-1859. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2167-x>
- Loenneke, J. P., Wilson, J. M., Wilson, G. J., Pujol, T. J., & Bembem, M. G. (2011). Potential safety issues with blood flow restriction training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(4), 510-518. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01290.x>
- Logerstedt, D., Di Stasi, S., Grindem, H., Lynch, A., Eitzen, I., Engebretsen, L., Risberg, M. A., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2014). Self-reported knee function can identify athletes who fail return-to-activity criteria up to 1 year after anterior cruciate ligament reconstruction : A delaware-oslo ACL cohort study. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 44(12), 914-923. <https://doi.org/10.2519/jospt.2014.4852>

- Lu, Y., Patel, B. H., Kym, C., Nwachukwu, B. U., Beletksy, A., Forsythe, B., & Chahla, J. (2020). Perioperative Blood Flow Restriction Rehabilitation in Patients Undergoing ACL Reconstruction: A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 8(3), 2325967120906822. <https://doi.org/10.1177/2325967120906822>
- Łyp, M., Stanisławska, I., Witek, B., Majerowska, M., Czarny-Działak, M., & Włostowska, E. (2018). The Timing of Rehabilitation Commencement After Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1096, 53-57. https://doi.org/10.1007/5584_2018_210
- MAD-UP: BFR TRAINING | *Élargit le champ des possibles*. (s. d.). Consulté 17 septembre 2023, à l'adresse <https://mad-up.com/fr>
- Malige, A., Baghdadi, S., Hast, M. W., Schmidt, E. C., Shea, K. G., & Ganley, T. J. (2022). Biomechanical properties of common graft choices for anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 95, 105636. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105636>
- Martin, E., Blanc-Lapierre, A., Champion, L., Guérin-Charbonnel, C., & Seegers, V. (2021). Minimisation versus randomisation stratifiée par bloc: Impact du choix de la méthode sur la comparabilité des groupes et la mesure de l'effet traitement. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 69, S15. <https://doi.org/10.1016/j.respe.2021.04.023>
- Martín-Hernández, J., Marín, P. J., Menéndez, H., Ferrero, C., Loenneke, J. P., & Herrero, A. J. (2013). Muscular adaptations after two different volumes of blood flow-restricted training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(2), e114-120. <https://doi.org/10.1111/sms.12036>
- Martini, A., Ayala, A., Lechable, M., Rannou, F., Lefèvre-Colau, M.-M., & Nguyen, C. (2022). Determinants of apprehension to return to sport after reconstruction of the anterior cruciate ligament: An exploratory observational retrospective study. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 14(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00433-1>

- Masson, E. (s. d.). *Fiche pratique d'utilisation du blood flow restriction (BFR)*. EM-Consulte. Consulté 19 décembre 2023, à l'adresse <https://www.em-consulte.com/article/1602939/references/fiche-pratique-d-utilisation-du-blood-flow-restric>
- Mather, R. C., Koenig, L., Kocher, M. S., Dall, T. M., Gallo, P., Scott, D. J., Bach, B. R., Spindler, K. P., & MOON Knee Group. (2013). Societal and economic impact of anterior cruciate ligament tears. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 95(19), 1751-1759. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.01705>
- McEwen, J. A., Owens, J. G., & Jeyasurya, J. (2019). Why is it Crucial to Use Personalized Occlusion Pressures in Blood Flow Restriction (BFR) Rehabilitation? *Journal of Medical and Biological Engineering*, 39(2), 173-177. <https://doi.org/10.1007/s40846-018-0397-7>
- Mentiplay, B. F., Perraton, L. G., Bower, K. J., Adair, B., Pua, Y.-H., Williams, G. P., McGaw, R., & Clark, R. A. (2015). Assessment of Lower Limb Muscle Strength and Power Using Hand-Held and Fixed Dynamometry: A Reliability and Validity Study. *PloS One*, 10(10), e0140822. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140822>
- Mok, E., Suga, T., Sugimoto, T., Tomoo, K., Dora, K., Takada, S., Hashimoto, T., & Isaka, T. (2020). Negative effects of blood flow restriction on perceptual responses to walking in healthy young adults: A pilot study. *Heliyon*, 6(8), e04745. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04745>
- Morishita, S., Tsubaki, A., Takabayashi, T., & Fu, J. B. (2018). Relationship between the rating of perceived exertion scale and the load intensity of resistance training. *Strength and conditioning journal*, 40(2), 94-109. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000373>
- Mouarbes, D., Menetrey, J., Marot, V., Courtot, L., Berard, E., & Cavaignac, E. (2019). Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis of Outcomes for Quadriceps Tendon Autograft Versus Bone-Patellar Tendon-Bone and Hamstring-Tendon Autografts. *The American Journal of Sports Medicine*, 47(14), 3531-3540. <https://doi.org/10.1177/0363546518825340>
- Myer, G. D., Paterno, M. V., Ford, K. R., Quatman, C. E., & Hewett, T. E. (2006). Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: Criteria-based progression through the return-

to-sport phase. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 36(6), 385-402.

<https://doi.org/10.2519/jospt.2006.2222>

Nakajima, T., Kurano, M., Iida, H., Takano, H., Oonuma, H., Morita, T., Meguro, K., Sato, Y., Nagata, T., & Group, K. T. (2006). Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey. *International Journal of KAATSU Training Research*, 2(1), 5-13.

<https://doi.org/10.3806/ijkr.2.5>

Nascimento, D. da C., Rolnick, N., Neto, I. V. de S., Severin, R., & Beal, F. L. R. (2022). A Useful Blood Flow Restriction Training Risk Stratification for Exercise and Rehabilitation. *Frontiers in Physiology*, 13, 808622. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.808622>

Nascimento, B. F. do, Lima, M. B. da R., Dias Júnior, J. M., Antunes Filho, J., Campos, T. V. de O., & Mendes Júnior, A. F. (2022). Calculation of the Minimal Important Clinical Difference of the Lysholm and IKDC Scores After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Revista Brasileira de Ortopedia*, 58(1), 79-84. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1756330>

Natsume, T., Ozaki, H., Saito, A. I., Abe, T., & Naito, H. (2015). Effects of Electrostimulation with Blood Flow Restriction on Muscle Size and Strength. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(12), 2621-2627. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000722>

Nguyen, C., Forelli, F., Mazeas, J., Hewett, T., Korakakis, V., & Rambaud, A. (2023). Influence du blood flow restriction training sur l'activité quadricipitale après reconstruction du ligament croisé antérieur. *Kinésithérapie, la Revue*, 23, 95. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2022.12.165>

Noehren, B., Andersen, A., Hardy, P., Johnson, D. L., Ireland, M. L., Thompson, K. L., & Damon, B. (2016). Cellular and Morphological Alterations in the Vastus Lateralis Muscle as the Result of ACL Injury and Reconstruction. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 98(18), 1541-1547. <https://doi.org/10.2106/JBJS.16.00035>

Normatech Medical. (2023, mars 24). *Normatech Medical*. Normatech Medical. https://www.normatech-medical.com/module/ph_simpleblog/module-ph_simpleblog-single?sb_category=informations&rewrite=methode-d-entrainement-blood-flow-restriction-bfr-mad-up

- Norozian, B., Arabi, S., Marashipour, S. M., Khademi Kalantari, K., Akbarzadeh Baghban, A., Kazemi, S. M., & Jamebozorgi, A. A. (2023). Recovery of Quadriceps Strength and Knee Function Using Adjuvant EMG-BF After Primary ACL Reconstruction. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 14, e6. <https://doi.org/10.34172/jlms.2023.06>
- Norte, G. E., Solaas, H., Saliba, S. A., Goetschius, J., Slater, L. V., & Hart, J. M. (2019). The relationships between kinesiophobia and clinical outcomes after ACL reconstruction differ by self-reported physical activity engagement. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 40, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.08.002>
- Nunes, E. A., Stokes, T., McKendry, J., Currier, B. S., & Phillips, S. M. (2022). Disuse-induced skeletal muscle atrophy in disease and nondisease states in humans: Mechanisms, prevention, and recovery strategies. *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, 322(6), C1068-C1084. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00425.2021>
- Nwachukwu, B. U., Adjei, J., Rauck, R. C., Chahla, J., Okoroha, K. R., Verma, N. N., Allen, A. A., & Williams, R. J. (2019). How Much Do Psychological Factors Affect Lack of Return to Play After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 7(5), 2325967119845313. <https://doi.org/10.1177/2325967119845313>
- Obermeier, M. C., Sikka, R. S., Tompkins, M., Nelson, B. J., Hamilton, A., Reams, M., & Chmielewski, T. L. (2018). Examination of Early Functional Recovery After ACL Reconstruction: Functional Milestone Achievement and Self-Reported Function. *Sports Health*, 10(4), 345. <https://doi.org/10.1177/1941738118779762>
- Ohta, H., Kurosawa, H., Ikeda, H., Iwase, Y., Satou, N., & Nakamura, S. (2003). Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 74(1), 62-68. <https://doi.org/10.1080/00016470310013680>
- Okoroha, K. R., Tramer, J. S., Khalil, L. S., Jildeh, T. R., Abbas, M. J., Buckley, P. J., Lindell, C., & Moutzouros, V. (2023). Effects of a Perioperative Blood Flow Restriction Therapy Program on Early Quadriceps Strength and Patient-Reported Outcomes After Anterior Cruciate Ligament

Reconstruction. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 11(11), 23259671231209694.
<https://doi.org/10.1177/23259671231209694>

Pairot de Fontenay, B., Roy, J.-S., Plemmons, M., & Willy, R. (2023). Knee joint underloading does not evolve after a two-week reintroduction to running program after anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 61, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2023.03.003>

Pairot de Fontenay, B., Van Cant, J., Gokeler, A., & Roy, J.-S. (2022). Reintroduction of Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With a Hamstrings Graft : Can We Predict Short-Term Success? *Journal of Athletic Training*, 57(6), 540-546.
<https://doi.org/10.4085/1062-6050-0407.21>

Pairot-de-Fontenay, B., Willy, R. W., Elias, A. R. C., Mizner, R. L., Dubé, M.-O., & Roy, J.-S. (2019). Running Biomechanics in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : A Systematic Review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(9), 1411-1424.
<https://doi.org/10.1007/s40279-019-01120-x>

Palmieri-Smith, R. M., & Lepley, L. K. (2015). Quadriceps Strength Asymmetry After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Alters Knee Joint Biomechanics and Functional Performance at Time of Return to Activity. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(7), 1662-1669. <https://doi.org/10.1177/0363546515578252>

Patterson, S. D., Hughes, L., Warmington, S., Burr, J., Scott, B. R., Owens, J., Abe, T., Nielsen, J. L., Libardi, C. A., Laurentino, G., Neto, G. R., Brandner, C., Martin-Hernandez, J., & Loenneke, J. (2019). Blood Flow Restriction Exercise : Considerations of Methodology, Application, and Safety. *Frontiers in Physiology*, 10, 533. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00533>

Pauzenberger, L., Syré, S., & Schurz, M. (2013). « Ligamentization » in hamstring tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction : A systematic review of the literature and a glimpse into the future. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery: Official Publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 29(10), 1712-1721. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.05.009>

- Perraton, L. G., Hall, M., Clark, R. A., Crossley, K. M., Pua, Y.-H., Whitehead, T. S., Morris, H. G., Culvenor, A. G., & Bryant, A. L. (2018). Poor knee function after ACL reconstruction is associated with attenuated landing force and knee flexion moment during running. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 26(2), 391-398. <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4810-5>
- Perriman, A., Leahy, E., & Semciw, A. I. (2018). The Effect of Open- Versus Closed-Kinetic-Chain Exercises on Anterior Tibial Laxity, Strength, and Function Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 48(7), 552-566. <https://doi.org/10.2519/jospt.2018.7656>
- Piussi, R., Berghdal, T., Sundemo, D., Grassi, A., Zaffagnini, S., Sansone, M., Samuelsson, K., & Senorski, E. H. (2022). Self-Reported Symptoms of Depression and Anxiety After ACL Injury: A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 10(1), 23259671211066493. <https://doi.org/10.1177/23259671211066493>
- Planque, F., & Tamalet, B. (2021). L'exercice avec restriction du flux sanguin (BFR): Une mode ? Une alternative ? Une méthode miracle ? L'expérience du centre médical FFF de Clairefontaine. *Journal de Traumatologie du Sport*, 38(2), 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jts.2021.02.002>
- Potts, G., Reid, D., & Larmer, P. (2022). The effectiveness of preoperative exercise programmes on quadriceps strength prior to and following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: A systematic review. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 54, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2021.12.004>
- Provencher, M., Hebert, L. J., Roy, J.-S., Morin, M., Perron, M., & de Fontenay, B. P. (2023). Does An Intensive Rehabilitation After ACL Reconstruction Result In Higher Full Return To Sport Rate?: 2799. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 55(9S), 953. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000988700.05760.bf>
- Queiros, V., Rolnick, N., Schoenfeld, B., Vieira, J., Sardeli, A., Kamis, O., Neto, G., Cabral, B., & Moreira, P. (2023). *Hypertrophic effects of low-load blood flow restriction training with different*

repetition schemes : A systematic review and meta-analysis. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3419589/v1>

- Rambaud, A. J. M., Ardern, C. L., Thoreux, P., Regnaud, J.-P., & Edouard, P. (2018). Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction : A scoping review. *British Journal of Sports Medicine*, 52(22), 1437-1444. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098602>
- Rambaud, A. J., Neri, T., & Edouard, P. (2022). Reconstruction, rehabilitation and return-to-sport continuum after anterior cruciate ligament injury (ACLR3-continuum): Call for optimized programs. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 65(4), 101470. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2020.101470>
- Rambaud, A., Samozino, P., & Edouard, P. (2016). Les tests fonctionnels dans le suivi des ligamentoplasties du LCA : L'exemple des Hop tests. *Kinesotherapie scientifique*, 55-57.
- Riera, J., Forelli, F., Coulondre, C., & Rambaud, A. (2023). Fiche pratique du « Single Hop Test ». *Journal de Traumatologie du Sport*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jts.2023.01.005>
- Rodriguez, K., Soni, M., Joshi, P. K., Patel, S. C., Shreya, D., Zamora, D. I., Patel, G. S., Grossmann, I., & Sange, I. (s. d.). Anterior Cruciate Ligament Injury : Conservative Versus Surgical Treatment. *Cureus*, 13(12), e20206. <https://doi.org/10.7759/cureus.20206>
- Rolnick, N., & Schoenfeld, B. (2020a). Blood Flow Restriction Training and the Physique Athlete : A Practical Research-Based Guide to Maximizing Muscle Size. *Strength and Conditioning Journal, Publish Ahead of Print*, 1. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000553>
- Rolnick, N., & Schoenfeld, B. (2020b). Can Blood Flow Restriction Used During Aerobic Training Enhance Body Composition in Physique Athletes? *Strength & Conditioning Journal, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000585>
- Roman, D. P., Burland, J. P., Fredericks, A., Giampetruzzi, N., Prue, J., Lolic, A., Pace, J. L., Crepeau, A. E., & Weaver, A. P. (2023). Early- and Late-Stage Benefits of Blood Flow Restriction Training on Knee Strength in Adolescents After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 11(11), 23259671231213034. <https://doi.org/10.1177/23259671231213034>

- Sadeqi, M., Klouche, S., Bohu, Y., Herman, S., Lefevre, N., & Gerometta, A. (2018). Progression of the Psychological ACL-RSI Score and Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : A Prospective 2-Year Follow-up Study From the French Prospective Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Cohort Study (FAST). *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 6(12), 2325967118812819. <https://doi.org/10.1177/2325967118812819>
- Saithna, A., Thauinat, M., Delaloye, J. R., Ouanezar, H., Fayard, J. M., & Sonnery-Cottet, B. (2018). Combined ACL and Anterolateral Ligament Reconstruction. *JBJS Essential Surgical Techniques*, 8(1), e2. <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.17.00045>
- Santiago-Pescador, S., Fajardo-Blanco, D., López-Ortiz, S., Peñín-Grandes, S., Méndez-Sánchez, R., Lucia, A., Martín-Hernández, J., & Santos-Lozano, A. (2023). Acute effects of electrostimulation and blood flow restriction on muscle thickness and fatigue in the lower body. *European Journal of Sport Science*, 23(8), 1591-1599. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2113145>
- Sato, Y. (2005). The history and future of KAATSU Training. *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(1), 1-5. <https://doi.org/10.3806/ijktr.1.1>
- Saulnier, J., Crête, M., Hébert, L. J., Lepage, C., & Perron, M. (2004). *Protocole d'évaluation de la force musculaire à l'aide du dynamomètre manuel chez les enfants et les adolescents*.
- Scheffler, S. U., Unterhauser, F. N., & Weiler, A. (2008). Graft remodeling and ligamentization after cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 16(9), 834-842. <https://doi.org/10.1007/s00167-008-0560-8>
- Schoenfeld, B., Fisher, J., Grgic, J., Haun, C., Helms, E., Phillips, S., Steele, J., & Vigotsky, A. (2021). Resistance Training Recommendations to Maximize Muscle Hypertrophy in an Athletic Population : Position Stand of the IUSCA. *International Journal of Strength and Conditioning*, 1. <https://doi.org/10.47206/ijsc.v1i1.81>
- Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Van Every, D. W., & Plotkin, D. L. (2021). Loading Recommendations for Muscle Strength, Hypertrophy, and Local Endurance : A Re-Examination of the Repetition Continuum. *Sports (Basel, Switzerland)*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/sports9020032>

- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2016). Effects of Resistance Training Frequency on Measures of Muscle Hypertrophy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(11), 1689-1697. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0543-8>
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), 1073-1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>
- Scott, B. R., Girard, O., Rolnick, N., McKee, J. R., & Goods, P. S. R. (2023). An Updated Panorama of Blood-Flow-Restriction Methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(12), 1461-1465. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0135>
- Scott, B. R., Loenneke, J. P., Slattery, K. M., & Dascombe, B. J. (2016). Blood flow restricted exercise for athletes: A review of available evidence. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 19(5), 360-367. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2015.04.014>
- Scott, B. R., Peiffer, J. J., & Goods, P. S. R. (2017). The Effects of Supplementary Low-Load Blood Flow Restriction Training on Morphological and Performance-Based Adaptations in Team Sport Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(8), 2147-2154. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001671>
- Shelbourne, K. D., & Nitz, P. (1990). Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*, 18(3), 292-299. <https://doi.org/10.1177/036354659001800313>
- Sherman, S. L., DiPaolo, Z. J., Ray, T. E., Sachs, B. M., & Oladeji, L. O. (2020). Meniscus Injuries: A Review of Rehabilitation and Return to Play. *Clinics in Sports Medicine*, 39(1), 165-183. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2019.08.004>
- Silva, J. C. G., Pereira Neto, E. A., Pfeiffer, P. A. S., Neto, G. R., Rodrigues, A. S., Bembem, M. G., Patterson, S. D., Batista, G. R., & Cirilo-Sousa, M. S. (2019). Acute and Chronic Responses of Aerobic Exercise With Blood Flow Restriction: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, 10, 1239. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01239>

- Skinner, J. S., Hutsler, R., Bergsteinová, V., & Buskirk, E. R. (1973). The validity and reliability of a rating scale of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports*, 5(2), 94-96.
- Slater, L. V., Hart, J. M., Kelly, A. R., & Kuenze, C. M. (2017). Progressive Changes in Walking Kinematics and Kinetics After Anterior Cruciate Ligament Injury and Reconstruction : A Review and Meta-Analysis. *Journal of Athletic Training*, 52(9), 847-860. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.6.06>
- Slysz, J. T., & Burr, J. F. (2018). The Effects of Blood Flow Restricted Electrostimulation on Strength and Hypertrophy. *Journal of Sport Rehabilitation*, 27(3), 257-262. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0002>
- Solie, B. S., Eggleston, G. G., Schwery, N. A., Doney, C. P., Kiely, M. T., & Larson, C. M. (2023). Clinic and Home-Based Exercise with Blood Flow Restriction Resolves Thigh Muscle Atrophy after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with the Bone-Patellar Tendon-Bone Autograft : A Case Report. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 11(13), 1885. <https://doi.org/10.3390/healthcare11131885>
- Sonnery-Cottet, B., Daggett, M., Helito, C. P., Fayard, J.-M., & Thauinat, M. (2016). Combined Anterior Cruciate Ligament and Anterolateral Ligament Reconstruction. *Arthroscopy Techniques*, 5(6), e1253-e1259. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2016.08.003>
- Sonnery-Cottet, B., Imbert, P., Freychet, B., Niglis, L., & Lutz, C. (2015). Le rôle synergique du ligament antéro-latéral et du ligament croisé antérieur dans le contrôle rotatoire du genou. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 101(8, Supplement), e8. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2015.09.327>
- Sonnery-Cottet, B., Saithna, A., Cavalier, M., Kajetanek, C., Temponi, E. F., Daggett, M., Helito, C. P., & Thauinat, M. (2017). Anterolateral Ligament Reconstruction Is Associated With Significantly Reduced ACL Graft Rupture Rates at a Minimum Follow-up of 2 Years : A Prospective Comparative Study of 502 Patients From the SANTI Study Group. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(7), 1547-1557. <https://doi.org/10.1177/0363546516686057>
- Sonnery-Cottet, B., Saithna, A., Quelard, B., Daggett, M., Borade, A., Ouanezar, H., Thauinat, M., & Blakeney, W. G. (2019). Arthrogenic muscle inhibition after ACL reconstruction : A scoping

review of the efficacy of interventions. *British Journal of Sports Medicine*, 53(5), 289-298.

<https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098401>

Spitz, R. W., Wong, V., Bell, Z. W., Viana, R. B., Chatakondi, R. N., Abe, T., & Loenneke, J. P.

(2022). Blood Flow Restricted Exercise and Discomfort : A Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(3), 871-879. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003525>

Stark, T., Walker, B., Phillips, J. K., Fejer, R., & Beck, R. (2011). Hand-held dynamometry

correlation with the gold standard isokinetic dynamometry : A systematic review. *PM & R: The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 3(5), 472-479.

<https://doi.org/10.1016/j.pmri.2010.10.025>

Stojanović, M. D. M., Andrić, N., Mikić, M., Vukosav, N., Vukosav, B., Zolog-Şchiopea, D.-N.,

Tăbăcar, M., & Melinte, R. M. (2023). Effects of Eccentric-Oriented Strength Training on Return to Sport Criteria in Late-Stage Anterior Cruciate Ligament (ACL)-Reconstructed Professional

Team Sport Players. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 59(6), 1111.

<https://doi.org/10.3390/medicina59061111>

Taberner, M., van Dyk, N., Allen, T., Jain, N., Richter, C., Drust, B., Betancur, E., & Cohen, D. D.

(2020). Physical preparation and return to performance of an elite female football player following ACL reconstruction : A journey to the FIFA Women's World Cup. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 6(1), e000843. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000843>

<https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000843>

Tajdini, H., Letafatkar, A., Brewer, B. W., & Hosseinzadeh, M. (2021). Association between

Kinesiophobia and Gait Asymmetry after ACL Reconstruction : Implications for Prevention of Reinjury. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3264.

<https://doi.org/10.3390/ijerph18063264>

Takarada, Y., Sato, Y., & Ishii, N. (2002). Effects of resistance exercise combined with vascular

occlusion on muscle function in athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 86(4), 308-314. <https://doi.org/10.1007/s00421-001-0561-5>

<https://doi.org/10.1007/s00421-001-0561-5>

Takarada, Y., Takazawa, H., & Ishii, N. (2000). Applications of vascular occlusion diminish disuse

atrophy of knee extensor muscles. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(12), 2035-2039. <https://doi.org/10.1097/00005768-200012000-00011>

<https://doi.org/10.1097/00005768-200012000-00011>

- Takeda, K., Hasegawa, T., Kiriya, Y., Matsumoto, H., Otani, T., Toyama, Y., & Nagura, T. (2014). Kinematic motion of the anterior cruciate ligament deficient knee during functionally high and low demanding tasks. *Journal of Biomechanics*, 47(10), 2526-2530. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.03.027>
- Tamalet, B., & Rochcongar, P. (2016). Épidémiologie et prévention de la rupture du ligament croisé antérieur du genou. *Revue du Rhumatisme Monographies*, 83(2), 103-107. <https://doi.org/10.1016/j.monrhu.2016.01.004>
- Tegner, Y., & Lysholm, J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 198, 43-49.
- Teixeira, E. L., Ugrinowitsch, C., de Salles Painelli, V., Silva-Batista, C., Aihara, A. Y., Cardoso, F. N., Roschel, H., & Tricoli, V. (2021). Blood Flow Restriction Does Not Promote Additional Effects on Muscle Adaptations When Combined With High-Load Resistance Training Regardless of Blood Flow Restriction Protocol. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(5), 1194-1200. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003965>
- Thomas, A. C., Wojtyś, E. M., Brandon, C., & Palmieri-Smith, R. M. (2016). Muscle Atrophy Contributes to Quadriceps Weakness after ACL Reconstruction. *Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia*, 19(1), 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.12.009>
- Thompson, K. M. A., Gamble, A. S. D., Kontro, H., Lee, J. B., & Burr, J. F. (2023). Low- and high-volume blood-flow restriction treadmill walking both improve maximal aerobic capacity independently of blood volume. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. <https://doi.org/10.1111/sms.14534>
- Tscholl, P. M., Haldemann, V. M., De Smet, A., Gard, S., Burgan, R., Yerganyan, V. V., & Menetrey, J. (2017). Comment choisir le type de greffe pour la reconstruction du ligament croisé antérieur? *Revue Médicale Suisse*, 13(569), 1339-1342. <https://doi.org/10.53738/REVMED.2017.13.569.1339>
- Van Cant, J., Pairet de Fontenay, B., Douaihy, C., & Rambaud, A. (2022). Characteristics of return to running programs following an anterior cruciate ligament reconstruction : A scoping review

- of 64 studies with clinical perspectives. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 57, 61-70.
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.07.006>
- van Melick, N., van Cingel, R. E. H., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hullegie, W., & Nijhuis-van der Sanden, M. W. G. (2016). Evidence-based clinical practice update : Practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *British Journal of Sports Medicine*, 50(24), 1506-1515.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095898>
- Waldron, K., Brown, M., Calderon, A., & Feldman, M. (2022). Anterior Cruciate Ligament Rehabilitation and Return to Sport : How Fast Is Too Fast? *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(1), e175-e179. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.10.027>
- Wang, C., Qiu, J., Wang, Y., Li, C., Kernkamp, W. A., Xi, X., Yu, Y., Li, P., & Tsai, T.-Y. (2023). Loaded open-kinetic-chain exercises stretch the anterior cruciate ligament more than closed-kinetic-chain exercises : In-vivo assessment of anterior cruciate ligament length change. *Musculoskeletal Science & Practice*, 63, 102715.
<https://doi.org/10.1016/j.msksp.2022.102715>
- Webster, K. E., Feller, J. A., & Lambros, C. (2008). Development and preliminary validation of a scale to measure the psychological impact of returning to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 9(1), 9-15.
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2007.09.003>
- Webster, K. E., Nagelli, C. V., Hewett, T. E., & Feller, J. A. (2018). Factors Associated With Psychological Readiness to Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery. *The American Journal of Sports Medicine*, 46(7), 1545-1550.
<https://doi.org/10.1177/0363546518773757>
- Weinhandl, J. T., Earl-Boehm, J. E., Ebersole, K. T., Huddleston, W. E., Armstrong, B. S. R., & O'Connor, K. M. (2013). Anticipatory effects on anterior cruciate ligament loading during

sidestep cutting. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 28(6), 655-663.

<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2013.06.001>

Welling, W., Benjaminse, A., Lemmink, K., Dingenen, B., & Gokeler, A. (2019). Progressive strength training restores quadriceps and hamstring muscle strength within 7 months after ACL reconstruction in amateur male soccer players. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 40, 10-18.

<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.08.004>

Welling, W., Benjaminse, A., Seil, R., Lemmink, K., Zaffagnini, S., & Gokeler, A. (2018). Low rates of patients meeting return to sport criteria 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective longitudinal study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 26(12), 3636-3644.

<https://doi.org/10.1007/s00167-018-4916-4>

Wengle, L., Migliorini, F., Leroux, T., Chahal, J., Theodoropoulos, J., & Betsch, M. (2022). The Effects of Blood Flow Restriction in Patients Undergoing Knee Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 50(10), 2824-2833.

<https://doi.org/10.1177/03635465211027296>

What is BFR? (s. d.). Blood Flow Restriction. Consulté 26 janvier 2024, à l'adresse

<https://bfrtraining.com/what-is-bfr/>

Wortman, R. J., Brown, S. M., Savage-Elliott, I., Finley, Z. J., & Mulcahey, M. K. (2021). Blood Flow Restriction Training for Athletes: A Systematic Review. *The American Journal of Sports Medicine*, 49(7), 1938-1944. <https://doi.org/10.1177/0363546520964454>

Wright, R. W., Haas, A. K., Anderson, J., Calabrese, G., Cavanaugh, J., Hewett, T. E., Lorring, D., McKenzie, C., Preston, E., Williams, G., & MOON Group. (2015). Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Rehabilitation: MOON Guidelines. *Sports Health*, 7(3), 239-243.

<https://doi.org/10.1177/1941738113517855>

Yang, J.-H., Hwang, K.-T., Lee, M. K., Jo, S., Cho, E., & Lee, J. K. (2023). Comparison of a Cryopneumatic Compression Device and Ice Packs for Cryotherapy Following Anterior

Cruciate Ligament Reconstruction. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 15(2), 234.

<https://doi.org/10.4055/cios21246>

Zaffagnini, S., Russo, R. L., Marcheggiani Muccioli, G. M., & Marcacci, M. (2013). The Videoinsight® method: Improving rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction--a preliminary study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 21(4), 851-858. <https://doi.org/10.1007/s00167-013-2392-4>

Zarzycki, R., Arhos, E., Failla, M., Capin, J., Smith, A. H., & Snyder-Mackler, L. (2021). Association of the Psychological Response to the ACL-SPORTS Training Program and Self-reported Function at 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*, 49(13), 3495-3501. <https://doi.org/10.1177/03635465211045388>

Annexes

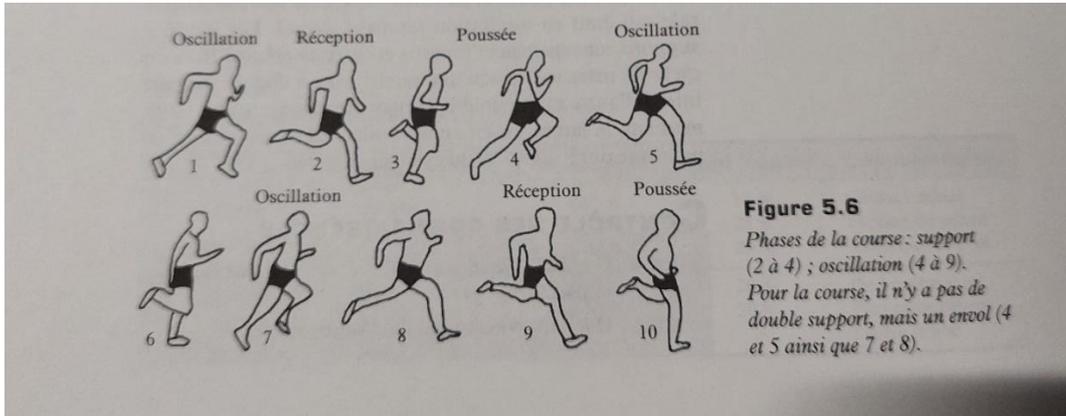
Table des Annexes :

Annexe 1 - Les différentes phases du cycle de la course	107
Annexe 2 - Durée et Intensité d'activation musculaire lors de la course.....	107
Annexe 4 - Caractéristiques biomécaniques des 3 greffons (DIDT, BPTB, TQ).....	109
Annexe 3 - Considérations pour le choix du type de greffon lors de la reconstruction	109
Annexe 5 - Inconvénients des greffons BPTB et DIDT	109
Annexe 6 - Classifications de l'AMI.....	111
Annexe 7 - Recommandations pour la rééducation du LCA par ASPETAR.....	113
Annexe 8 - Recommandations pour la rééducation post-reconstruction du LCA	114
Annexe 9 - Prises en charge selon les phases de rééducation du LCA.....	115
Annexe 10 - Présentation de l'évidence scientifique de plusieurs notions de la rééducation du LCA.....	116
Annexe 11 - Graphique présentant le degré d'évidence de plusieurs aspects de la rééducation du LCA.....	116
Annexe 12 - Grade de recommandations pour plusieurs techniques de rééducation post-opératoire du LCA.....	117
Annexe 13 - Présentation du modèle bio-psycho-social autour du processus de RTP	119
Annexe 14 - Présentation de l'affichage du système MadUp®	121
Annexe 15 - Notice d'information et formulaire de consentement à l'étude.....	123
<i>Annexe 16 - Notice d'information et formulaire de consentement à l'étude</i>	<i>124</i>
Annexe 17 - Données Démographiques des patients participants à l'étude.....	126
Annexe 18 - Score de Lyshom-Tegner pour le niveau d'activité	128
Annexe 19 - Questionnaire d'inclusion à l'étude	130
Annexe 20 - Déroulement Chronologique durant les visites de l'étude	132
Annexe 21 - Tableau présentant le contenu des différentes visites	133
Annexe 22 - Présentation de l'échelle de gestion de la charge par RPE	135
Annexe 23 - Score IKDC version française.....	137
Annexe 24 - Score IKDC version française.....	138
Annexe 25 - Méthode de calcul pour le score IKDC inspiré de Physio tutors.....	139
Annexe 26 - Score ACL-RSI version française	141
Annexe 27 - Score ACL-RSI version française	142
Annexe 28 - Présentation du Sweep/Stroke Test pour l'épanchement	144
Annexe 29 - Protocole d'Evaluation de la force musculaire avec dynamomètre	146
Annexe 30 - Protocole d'Evaluation de la force musculaire avec dynamomètre	147
Annexe 31 - Consignes de réalisation du single hop test.....	149

Annexe 32 - Consignes de réalisation du test single leg squat	151
Annexe 33 - Critères autorisant le RTR pour les patients	153
Annexe 34 - Algorithme décisionnel pendant le RTR.....	155
Annexe 35 - Fiche conseil pour l'auto-évaluation de l'épanchement par les patients lors de la réalisation du RTR.....	157
Annexe 36 - Impact des ischio-jambiers sur différentes vitesses de course.....	159
Annexe 37 - Durée d'activation des ischio-jambiers pendant la course	159
Annexe 38 - Tableau présentant les principales différences dans le protocole proposé entre notre mémoire et celui de Jaffredo. (2020)	162
Annexe 39 - Tableau présentant les différents protocoles de plusieurs études ayant utilisé l'exercice avec BFR et ayant le score IKDC comme critère de jugement.....	165
Annexe 40 - Tableau présentant les protocoles de différentes études utilisant l'exercice avec BFR et s'intéressant aux adaptations musculaires	169
Annexe 41 - Recommandations et grades des preuves pour l'entraînement	171
Annexe 42 - Recommandations d'entraînement en hypertrophie.....	172
Annexe 43 - Recommandations d'utilisation du BFR	173
Annexe 44 - Certification de participation à une conférence de Full Physio sur le RTR	175

Annexe 1 : Les différentes phases du cycle de la course

Annexe 2 : Durée et Intensité d'activation musculaire lors de la course

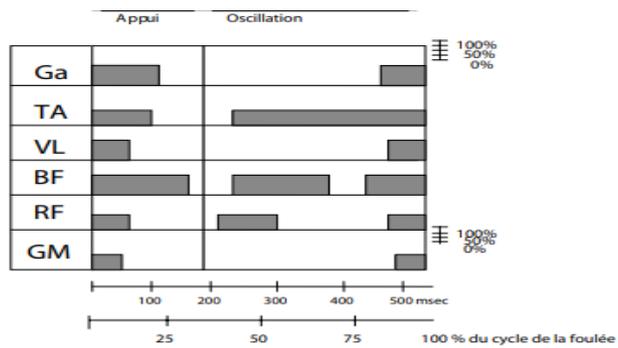


Annexe 1 - Les différentes phases du cycle de la course

Par Allard et al. (2012)

Figure 4. Durée et niveau d'activité des muscles étudiés

Les données représentées sont issues de résultats obtenus à 15 km.h⁻¹. Les périodes d'activation correspondent à la détection d'un signal électromyographique pris en compte lorsqu'il est supérieur ou égal à 10 % du pic de l'enveloppe de la bouffée considérée.



Annexe 2 - Durée et Intensité d'activation musculaire lors de la course

Par Hanon, (2005)

Annexe 3 : Caractéristiques biomécaniques des 3 greffons (DIDT, BPTB, TQ)

Annexe 4 : Considérations pour le choix du type de greffon lors de la reconstruction

Annexe 5 : Inconvénients des greffons BPTB et DIDT

TABLEAU 1		Caractéristiques biomécaniques et opératoires des autogreffes
------------------	--	--

BPTB: greffe du tendon rotulien; DIDT: greffe du tendon des ischiojambiers; TQ: greffe du tendon quadricepsital.

	Avantages	Inconvénients
BPTB	<ul style="list-style-type: none"> Charge à la résistance supérieure (2977N vs. 2160N pour le LCA natif) Consolidation rapide par guérison osseuse Longueur idéale du tendon Ratio ischio-jambiers/quadriceps respecté en postopératoire 	<ul style="list-style-type: none"> Greffe tendineuse fine et non adaptable Douleurs antérieures de genou fréquentes Perte de sensibilité prépatellaire Vulnérabilité structurelle de l'appareil extenseur Tendinite patellaire Patella infera ou fracture patellaire
DIDT	<ul style="list-style-type: none"> Charge à la résistance supérieure (4SHT : 4090N) Intégrité de l'appareil extenseur Longueur et épaisseur adaptable Possibilité d'associer la technique à double faisceau (double-bundle) Possibilité d'associer une reconstruction du ligament antéro-latéral (ALL) 	<ul style="list-style-type: none"> Consolidation os-tendon plus lente Elargissement du tunnel par effet élastique (bungee-effect) Perte de sensibilité (nerf saphène) Perte de flexion en actif Effet négatif sur le ratio ischio-jambiers/quadriceps Effet défavorable sur le contrôle dynamique de la rotation interne du tibia Greffe variable (longueur et épaisseur)
TQ	<ul style="list-style-type: none"> Charge à la résistance supérieure (2174N) Hautement polyvalent (diamètre, longueur, pastille osseuse) Préservation de la force de l'appareil extenseur Ratio ischio-jambiers/quadriceps respecté en postopératoire Faible incidence de douleur antérieure du genou Pas de perte de sensibilité Faible influence sur la mobilité de la patella et sur la cicatrisation de la région infrapatellaire 	<ul style="list-style-type: none"> Variation anatomique (couches tendineuses et graisseuses entre les feuillets, hautement variables) Risque de formation de large tissu cicatriciel Risque d'hématome postopératoire Risque de fracture patellaire lors de greffe avec pastille osseuse

Annexe 3 - Caractéristiques biomécaniques des 3 greffons (DIDT, BPTB, TQ)

Tableaux issus de Tscholl et al. (2017)

TABLEAU 2		Algorithme décisionnel de la greffe idéale pour la reconstruction du ligament croisé antérieur
------------------	--	---

Tendon rotulien (BPTB)		
<ul style="list-style-type: none"> + Rééducation accélérée et retour précoce au sport + Hyperextension du genou en préopératoire + Sujet aux lésions des ischio-jambiers + Lésion associée des ligaments collatéraux - Activités fréquentes à genou/position accroupie - Patella alta ou hypermobilité de la rotule - Tendinopathie patellaire ipsi- ou contro-latérale - Antécédent d'Osgood-Schlatter - Cartilages de conjugaison ouverts 		
Ischio-jambiers (DIDT)		
<ul style="list-style-type: none"> + Cartilages de conjugaison ouverts + Cicatrice « esthétique » + Double faisceau ou reconstruction associée du ALL + Patella alta ou douleur fémoro-patellaire +/- Activités fréquentes à genou +/- Nécessité d'une greffe de large diamètre - Lésion associée du ligament collatéral interne - Valgus fonctionnel ou collapsus médial - Antécédent de blessures aux ischio-jambiers 		
Tendon quadricepsital (TQ)		
<ul style="list-style-type: none"> + Greffe de large diamètre avec nécessité d'une fixation rigide + Lésion associée des ligaments collatéraux + Activités fréquentes à genou + Reprise chirurgicale de LCA + Reconstruction par double faisceau +/- Cartilages de conjugaison ouverts (soit utilisé sans pastille osseuse) +/- Patella alta ou douleur fémoro-patellaire +/- Patella bipartita - Conséquence esthétique - Antécédent de BPTB avec large pastille osseuse 		
Allogreffe		
<ul style="list-style-type: none"> + Reconstruction multiligamentaire du genou + Cicatrices « esthétiques » +/- Patients > 40 ans avec faible niveau d'activité +/- Reprise chirurgicale de LCA 		

Annexe 4 - Considérations pour le choix du type de greffon lors de la reconstruction

DIDT	BPTB
Taux d'infection supérieur	Douleur antérieure de genou
Laxité supérieure du greffon	Difficulté à s'agenouiller
Difficulté en extension de hanche et en flexion de genou	Risque de rupture du tendon patellaire

Annexe 5 - Inconvénients des greffons BPTB et DIDT

Selon Mouarbes et al. (2019)

Annexe 6 : Classifications de l'AMI

Classification AMI

- **Grade 0** : Contraction normal du VMO.
- **Grade 1** : **Inhibition motrice du VMO sans déficit d'extension du genou.**
 - **1a** : Inhibition motrice du VMO réversible quelques minutes après le début des exercices simples d'extension assistée.
 - **1b** : Inhibition motrice du VMO réfractaire à de simples exercices d'extension assistée, nécessitant des programmes de rééducation plus longs et spécifiques.
- **Grade 2** : **Inhibition motrice du VMO associé à un déficit d'extension du genou due à une contracture réflexe des ischio-jambiers.**
 - **2a** : activation et perte d'amplitude de mouvement réversibles après quelques minutes de fatigue des ischio-jambiers et le début d'exercices simples d'extension active.
 - **2b** : réfractaire à la fatigue des ischio-jambiers et/ou à des exercices simples d'extension active, d'où la nécessité de programmes de rééducation plus longs et spécifiques.
- **Grade 3** : **Déficit chronique d'extension passive due à la rétraction de la capsule postérieure.**
 - Arthrolyse postérieure étendue obligatoire avec des programmes spécifiques de rééducation préopératoire et postopératoire.

Sonnery-Cottet B, Hopper GP, Gousopoulos L, et al. [Arthropogenic Muscle Inhibition Following Knee Injury or Surgery: Pathophysiology, Classification, and Treatment](#). *Video Journal of Sports Medicine*. 2022;2(3). doi:10.1177/26350254221086295

Annexe 6 - Classifications de l'AMI

Selon Sonnery-Cottet et al. (2022)

Annexe 7 : Recommandations pour la rééducation du LCA par ASPETAR (Kostifaki et al., 2023)

Annexe 8 : Recommandations pour la rééducation post-reconstruction du LCA issues de la revue Andrade et al. (2020)

Annexe 9 : Prises en charge selon les phases de rééducation du LCA (Cooper & Hugues, 2019)

Annexe 10 : Présentation de l'évidence scientifique de plusieurs notions de la rééducation du LCA issu de Brinlee et al. (2022)

Annexe 11 : Graphique présentant le degré d'évidence de plusieurs aspects de la rééducation du LCA issu de Culvenor et al. (2022)

Annexe 12 : Grade de recommandations pour plusieurs techniques de rééducation post-opératoire du LCA Glatke et al. (2022)

Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after ACLR



Figure 1 Summary of the recommendations on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction.

Annexe 7 - Recommandations pour la rééducation du LCA par ASPETAR

Par Kostifaki et al. (2023)

Review

Table 4 Recommendations on ACL rehabilitation and postoperative follow-up assessment.

Recommendation item	NZGG ²⁸	DOA ²⁶	MOON ²⁴	AAOS ²³	KNGF ²⁷	APTA ²⁵
Supervised rehabilitation vs home-based exercises	Intensive supervised physical therapy may be used in some cases.	–	Home-based rehabilitation may be used in motivated patients.	–	Uncertain recommendation on supervised rehabilitation versus home-based exercises. A minimally supervised rehabilitation may be used in specific groups of patients that are highly motivated and live far from a physical therapist.	Exercise ambulatory programmes supplemented by a prescribed home-based programme supervised by a physical therapist should be used.
Accelerated rehabilitation	Uncertain recommendation on 'accelerated rehabilitation programmes'.	–	Uncertain recommendation on 'accelerated rehabilitation programmes'.	Uncertain recommendation on 'accelerated rehabilitation programmes'.	Prehabilitation and progressive goal-based rehabilitation rather than time base should be used.	Accelerated rehabilitation characterised as 'immediate knee mobilisation' should be used.
Continuous passive motion	–	–	Continuous passive motion is not recommended.	–	–	Continuous passive motion may be used in the immediate postoperative period.
ROM restrictions	–	–	Immediate knee mobilisation should be used following ACL reconstruction.	–	–	Immediate knee mobilisation (within 1 week) should be used following ACL reconstruction.
Weight bearing restrictions	–	–	Immediate full WB should be used following ACL reconstruction.	–	Immediate WB should be used after specific criteria is fulfilled.	Early WB (within 1 week) may be used as tolerated.
Postoperative functional bracing	Postoperative knee brace should not be used.	Postoperative knee brace should not be used.	Postoperative knee brace should not be used.	The routine use of postoperative functional knee brace should not be used.	–	Immediate postoperative knee brace according to patient's preferences or associated ligament injuries.
OKC and CKC	OKC exercises (90–45°) may be used as early as 4 weeks.	Both OKC and CKC exercises may be used during strength training but CKC should be prioritised over OKC exercises at the early phase of rehabilitation.	Uncertain recommendation for OKC exercises in earlier stages of the rehabilitation. OKC exercises may be used after 6 postoperative weeks	–	Both OKC and CKC exercises may be used. OKC exercises (90–45°) may be used as early as 4 weeks.	–
Strength and neuromuscular training	–	The combination of strength and neuromuscular training should be used in the postoperative rehabilitation.	Neuromuscular training should be used in most phases of ACL postoperative rehabilitation.	–	Isometric quadriceps exercises should be used from the first postoperative week. Eccentric (in CKC) and concentric quadriceps training should be used from the third postoperative week. Neuromuscular exercises should be used in addition to strength training.	WB and non-WB concentric and eccentric exercises should be used from 4 to 6 postoperative weeks (2–3x/week during 6–10 months). Neuromuscular re-education training should be used in addition to muscle strengthening exercises.
Neuromuscular electrostimulation	–	–	NMES may be used according to the clinician's preference.	–	NMES may be used in addition to isometric strength training at the first postoperative weeks	NMES should be used for the initial 6–8 postoperative weeks.
Cryotherapy	–	–	–	–	Cryotherapy may be used in the first postoperative week.	Immediate cryotherapy should be used.
Outcomes and/or functional testing	–	The combination of clinical (Lachman, pivot shift and anterior drawer tests) and patient-reported Outcomes measures (IKDC subjective and KOOS) should be used. Tegner score may be used for measurement of activity	–	Measures of knee pain, activities of daily living, quality of life, functional status, activity tolerance and self-reported physical function assessment should be used.	Psychological changes during rehabilitation with objective instruments should be used.	A combination of validated patient-reported outcome measures (IKDC 2000 or KOOS), activity level tool (Tegner or Marx) and a psychological questionnaire (ACL-RSI) should be used. Functional performance assessment (appropriated clinical or field testing) should be used.

Table 4 Continued

Recommendation item	NZGG ²⁸	DOA ²⁶	MOON ²⁴	AAOS ²³	KNGF ²⁷	APTA ²⁵
RTS criteria	–	A minimum 3 month cut-off to resume heavy physical activity in labour or sports should be used.	–	Uncertain recommendation on waiting for a specific time or achieving a specific functional goal prior to return to sport.	An extensive test battery for assessing quantity and quality of movement should be used. LSI of >90% for cut-off point may be used may be used for strength and hop tests. For pivoting/contact sports, an LSI of >100% should be used.	Functional testing to determine a patient's readiness to return to activities should be used.

Colour coding: Green, 'should be used'; Yellow, 'may be used'; Dark red, 'should not be used'; Light red, 'uncertain recommendation'.

AAOS, American Academy of Orthopaedic Surgeons; ACL, anterior cruciate ligament; ACL-RSI, anterior cruciate ligament – return to sport after injury; APTA, American Physical Therapy Association; CKC, closed kinetic chain; CPG, clinical practice guideline; DOA, Dutch Orthopaedic Association; IKDC, International Knee Documentation Committee; KNGF, Royal Dutch Society for Physical Therapy; KOOS, Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score; LSI, Limb Symmetry Index; MOON, Multicenter Orthopaedic Outcomes Network; NMES, neuromuscular electrical stimulation; NR, non-reported; NZGG, New Zealand Guidelines Group; OKC, open kinetic chain; ROM, range of movement; RTS, return to sport; WB, weight bearing.

Annexe 8 - Recommendations pour la rééducation post-reconstruction du LCA
Issues de la revue Andrade et al. (2020)

ACL Rehab:

Melbourne ACL
Rehabilitation Guide

Goal Based



PHASE **Pre Op** Injury recovery & readiness for surgery



PHASE **1** Recovery from surgery



PHASE **2** Strength and neuromuscular control



PHASE **3** Running, agility and landings



PHASE **4** Return to sport



PHASE **5** Prevent re-injury



Phase 1

Recovery from Surgery

Most important goals



Phase 2

Strength and neuromuscular control

Most important goals



Annexe 9 - Prises en charge selon les phases de rééducation du LCA

Par Cooper & Hugues, (2019)

Clinical Recommendations

SORT: Strength of Recommendation Taxonomy

A: consistent, good-quality patient-oriented evidence

B: inconsistent or limited-quality patient-oriented evidence

C: consensus, disease-oriented evidence, usual practice, expert opinion, or case series

Clinical Recommendation	SORT Evidence Rating
Initiate preoperative rehabilitation to restore quiet knee and achieve preoperative milestones	B
Initiate quadriceps strengthening (90°-0°) immediately postoperation and utilize reliable objective testing to monitor progress	B
Utilize both biological and criterion-based timelines to inform decision making	A
Delay RTS after ACLR until a minimum of 9 months (allografts: 12 months) and after successful completion of RTS test battery	A
The ACL-RSI is a valid tool to monitor psychological preparedness after ACLR	B
Return to competition should be stepwise and after restoration of preinjury conditioning level	C
A secondary prevention program should be performed 2 times per week throughout athletic career	B

Annexe 10 - Présentation de l'évidence scientifique de plusieurs notions de la rééducation du LCA

Issu de Brinlee et al. (2022)

Evidence Map for ACL Rehabilitation

We lack beneficial interventions with high certainty evidence

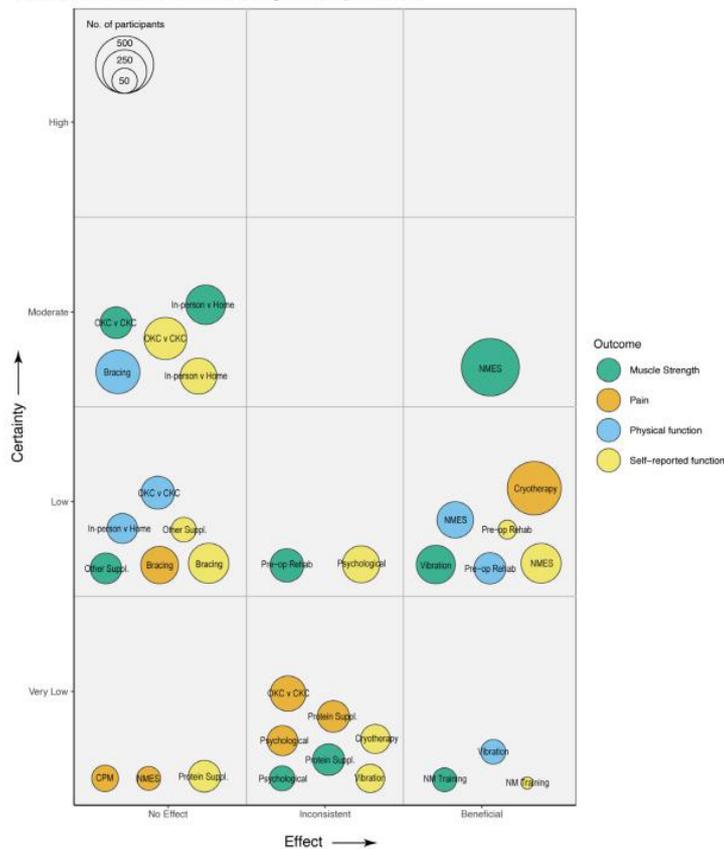


Figure 4 Evidence map for ACL rehabilitation interventions. Only the four most consistent outcomes reported across systematic reviews presented for clarity. CKC, closed kinetic chain; CPM, continuous passive motion; NM, neuromuscular; NMES, neuromuscular electrical stimulation; OKC, open kinetic chain.

Annexe 11 - Graphique présentant le degré d'évidence de plusieurs aspects de la rééducation du LCA

Issu de Culvenor et al. (2022)

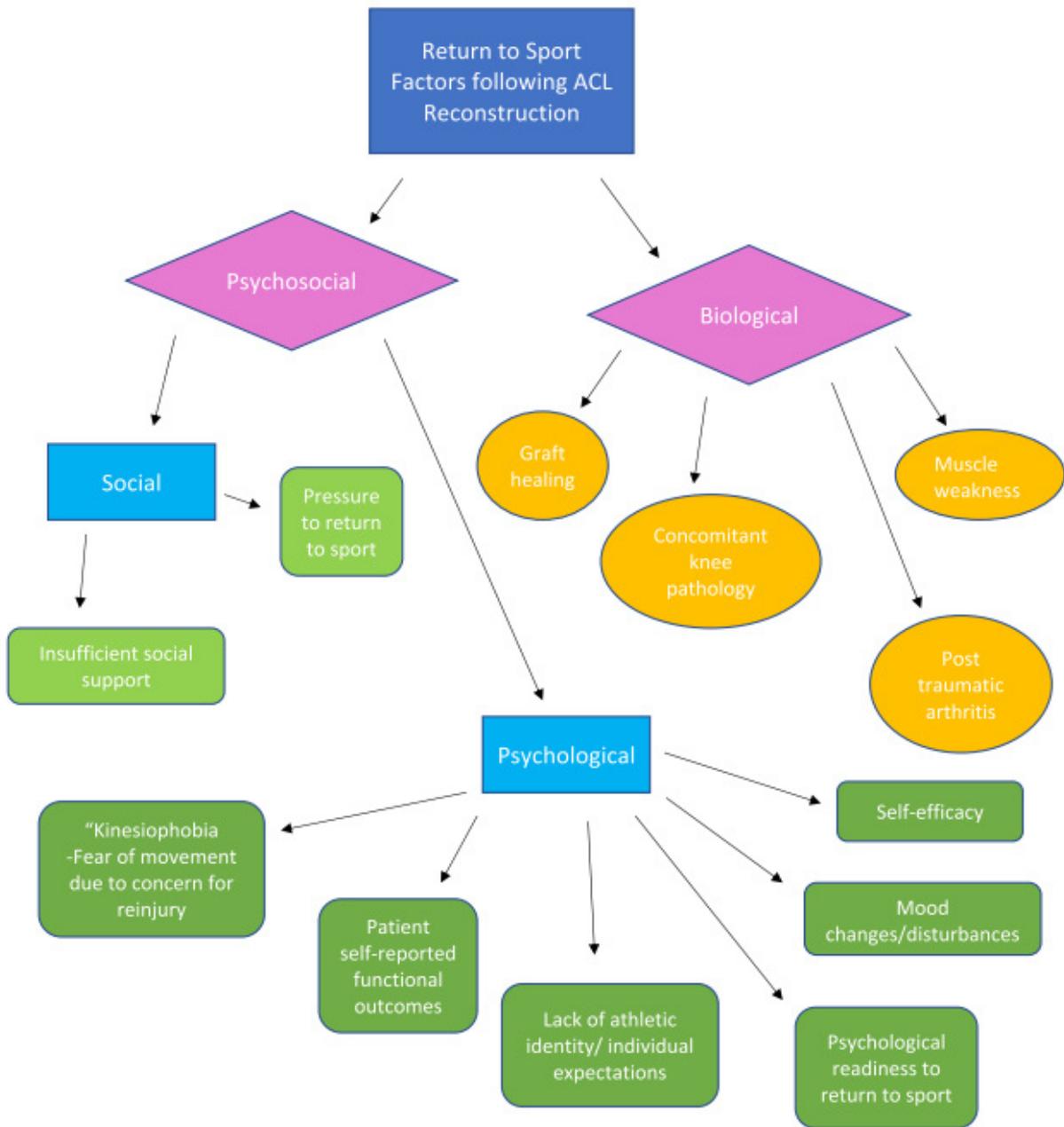
TABLE I Summary of the Identified Investigations on Recovery and Rehabilitation Following ACL Reconstruction			
Modality Investigated	No. of Studies	Results	Grade of Recommendation*
Accelerated rehabilitation	3	Accelerated rehabilitation in patients after ACL reconstruction utilizing a semitendinosus-gracilis autograft with early, full range of motion and weight-bearing in the immediate postoperative period ⁹ along with a shortened timetable for exercise and functional activities ¹⁰ may be equivalent to standard rehabilitation protocols in short-term outcomes and can be used for a general patient population ¹¹	B
BFR training	2	Results support the argument against using BFR with high-intensity resistance exercise ¹³ ; BFR done with low-intensity exercise leads to significantly lower knee joint pain ¹²	B
Bracing	3	Postoperative knee bracing may not have any advantages, including improved surgical outcomes such as limb asymmetry ¹⁴ , anteroposterior knee laxity ¹⁵ , knee joint effusion ¹⁶ , and various patient-reported outcome measures ¹⁶	B
Cryotherapy	2	Results provide evidence to support the use of cryotherapy both preoperatively ¹⁸ and postoperatively ¹⁹ as an analgesic for patients undergoing ACL reconstruction	B
Exercise modalities	3	Early introduction of OKC exercise may improve ACL reconstruction outcomes ²⁰ and implementation of high-intensity plyometrics into rehabilitation protocols provides no significant benefits ²²	B
Hop, strength, and isokinetic testing	5	EPIC levels may be more accurate than LSI when using functional test results to predict reinjury rates ²⁶ and hip external rotation strength may be the most accurate predictor of hop test performance ²⁵	B
Nerve blocks	3	Femoral nerve blocks and other types of local anesthesia provide primary pain relief following ACL reconstruction with a relatively low risk of long-term deficits or complications ^{30,32}	A
NMES	3	Results provide micro-level ³⁴ and macro-level ^{35,36} evidence in support of NMES usage at various time points before and after ACL reconstruction; NMES may either be used on its own ^{34,35} or in addition to various exercises ³⁵ with minimal risk	A
Patient-reported outcome measures	5	Athletic patients who are motivated during rehabilitation are more likely to return to pre-injury sport levels, with increased knee satisfaction, after surgery ³⁸ ; TSK-11 and ACL-RSI are valuable tools in evaluating appropriateness for return to sport	B
Return-to-sport and reinjury rates	7	Results support the importance of psychological readiness in return to sport ⁴⁶ , utilization of functional and objective testing results as return-to-sport criteria ^{47,49} , development of a secondary injury prevention program ⁵⁰ , and the importance of having athletes refrain from participating in sports without limitations until at least 9 months after ACL reconstruction ⁴³	B
Sensorimotor training	6	EMG biofeedback usage may improve muscular strength ⁵³ and whole-body vibration therapy may improve postural control, muscular performance, and various functional testing outcomes ⁵⁴	A
Supervised rehabilitation	2	Supervised rehabilitation may be more effective than unsupervised exercise ^{59,60}	B

*According to Wright⁴, grade A indicates good evidence (Level-I studies with consistent findings) for or against recommending intervention; grade B, fair evidence (Level-II or III studies with consistent findings) for or against recommending intervention; grade C, poor-quality evidence (Level-IV or V studies with consistent findings) for or against recommending intervention; and grade I, insufficient or conflicting evidence not allowing a recommendation for or against intervention.

Annexe 12 - Grade de recommandations pour plusieurs techniques de rééducation post-opératoire du LCA

Issues de Glattke et al. (2022)

Annexe 13 : Présentation du modèle bio-psycho-social autour du processus de RTP
par Jenkins et al. (2022)

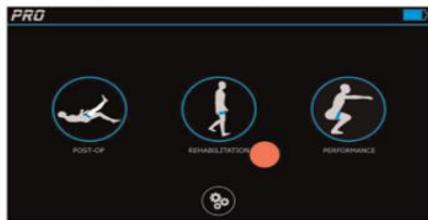


Annexe 13 - Présentation du modèle bio-psycho-social autour du processus de RTP

Par Jenkins et al. (2022)

Annexe 14 : Présentation de l'affichage du système MadUp® (Planque et Tamalet, 2021)

1/ Choix du programme en fonction de la phase de rééducation



4/ Calibration



2/ Choix du programme



5/ Fin de calibration, prêt pour la séance



3/ Conception de la séance



6/ Séance



- A : Nombre de mouvements restants
- B : Consigne de pression basse (% pression d'occlusion)
- C : Cadence de métronome à suivre
- D : Progression dans le SET
- E : Protocole en cours
- F : Courbe de contraction (%RM) myoelectrique
- G : Arrêt de la séance vers le menu stats
- H : Bouton d'arrêt d'urgence (retour au menu principal + dépressurisation)
- I : Indice batterie
- J : nombre de mouvements dans la série
- K : Temps d'exercice total
- L : Pression contrôlée en temps réel

Annexe 14 - Présentation de l'affichage du système MadUp®

Issu de Planque et Tamalet, (2021)

Annexe 15 : Notice d'information et formulaire de consentement à l'étude

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Présentation du Chercheur :

Ce projet de recherche entre dans le cadre du mémoire de fin d'étude de masso-kinésithérapie de CARRE Anthony, étudiant à l'Institut de Formation en Masso-Kinésithérapie de Lyon. Ce projet est encadré par Mme FRIANT Yola et Mr BEASSE Valentin.

CARRE Anthony – anthony.carre@etu.univ-lyon1.fr – 06 49 35 38 40

Introduction :

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire et de comprendre les renseignements qui suivent. Ce document vous explique le but de ce projet de recherche, ses procédures, avantages, risques et inconvénients. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles à la personne qui vous présente ce document.

Contexte et Objectifs du Projet :

La rupture du ligament croisé antérieur est fréquente, notamment dans le milieu sportif et la rééducation qui suit la reconstruction est longue. Le retour au sport est généralement espéré entre 6 et 9 mois après la reconstruction. Ainsi, la reprise d'activité physique préalable est primordiale, tant d'un point de vue physique que d'un point de vue mental pour les patients. C'est pour cela, que la reprise de la course à pied, généralement autour de 3 mois est une étape majeure.

Par le biais de cette étude, nous souhaitons étudier de quelle manière un entraînement précoce sous occlusion vasculaire (blood flow restriction training) peut permettre de faciliter l'atteinte de plusieurs critères, physiques et psychologiques, préalables à cette reprise de course. Nous souhaitons aussi nous attarder sur la sphère psychologique associée à cette reprise de course avec l'appréhension et la fonction perçue par le patient. Enfin, nous souhaitons explorer l'impact de cette rééducation sur la réalisation d'un petit programme de reprise de course progressive sur 2 semaines.

Lieu de la recherche :

Cette étude se déroulera en partenariat avec les cliniques ou centres orthopédiques suivants (...X...). Le rendez-vous initial d'inclusion, ainsi que les évaluations finales se réaliseront au sein de ces centres. La rééducation se déroulera au sein d'un cabinet de kinésithérapie de votre choix (dans le respect du matériel nécessaire au protocole type proposé), sachant qu'une liste de cabinets vous sera proposée).

Ce qui est attendu de vous :

L'étude proposée est intensive et exigeante avec 65 sessions d'entraînements sur 14 semaines (soit 4 fois par semaine). Ainsi, il faut être motivé afin de suivre la rééducation et le protocole proposé à la lettre. Aucun exercice supplémentaire ne vous sera demandé à domicile. La littérature a montré qu'une rééducation précoce et intensive est bénéfique aux patients à plus long terme d'un point de vue fonctionnel.

Déroulement de l'étude :

Après signature du formulaire de consentement, vous serez aléatoirement attribué à l'un des deux groupes : rééducation classique OU rééducation classique + application de l'occlusion vasculaire.

Par la suite, vous devrez démarrer, dans les 2 semaines suivants votre opération, le protocole type proposé auprès d'un masseur kinésithérapeute diplômé d'Etat. Vous réaliserez ainsi 4 séances par semaine au cabinet, et ce, sur 14 semaines :

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre est conservé par l'examineur

Annexe 15 - Notice d'information et formulaire de consentement à l'étude

Impact de la rééducation avec Blood Flow Restriction sur les critères physiques et psychologiques au moment du retour à la course après reconstruction du LCA.

- Semaine 1 à 4 : travail de réveil musculaire et reprise de la marche
- Semaine 5 à 9 : travail de renforcement musculaire léger et d'exercice en endurance (vélo)
- Semaine 10 à 14 : travail de renforcement musculaire avec des charges plus élevées
- A 14 semaines : vérification des critères de reprise de la course (force, tests fonctionnels, questionnaires)
- Si validation, un programme de reprise de course sur 2 semaines vous sera proposé
- Si validation, une évaluation terminale sera réalisée.

La rééducation qui vous sera proposée dans ce protocole sera la même que la rééducation standard, seulement plus intensive et avec, pour certains, l'application de l'occlusion vasculaire dont nous présenterons les effets ci-dessous.

Avantages, Risques et Inconvénients liés à la participation :

L'application du Blood Flow Restriction a montré dans les études récentes son intérêt dans la rééducation post-opératoire en permettant de limiter la perte musculaire, puis par la suite de gagner en force et en volume musculaire. L'exercice sous occlusion permet aussi de diminuer les douleurs ressenties par les patients au niveau du genou.

L'exercice sous BFR n'est pas forcément très agréable, surtout lors des premières séances mais permet des adaptations musculaires plus importantes que la rééducation standard.

Plusieurs études ont démontrées que l'exercice sous occlusion est relativement sûr lorsque les critères d'application sont bien respectés et adaptés aux recommandations, ce qui est le cas dans notre protocole. Les contre-indications de son application sont écartées par le questionnaire auquel vous avez répondu précédemment. Malgré tout, quelques rares événements indésirables pourraient arriver : hématome, engourdissement, fourmillements, thrombose veineuse ou rhabdomyolyse. Notons que la proportion des événements indésirables importants est extrêmement rare (< 0,1%).

Confidentialité et Droit :

Votre participation à cette étude est volontaire et vous pourrez vous en extraire à tout moment si nécessaire. Toutes les informations vous concernant seront anonymisées et stocker dans un logiciel sécurisé et conforme aux réglementations. La confidentialité de l'étude sera totale. Même si l'étude venait à être publiée par la suite, l'anonymat sur votre identité sera conservé.

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à X (ou par téléphone au Y).

Consentement à la participation :

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, que le chercheur a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'il vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche à tout moment, sans préjudice.

A remplir par le participant :

J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche.

Date, Nom, Prénom, Signature :

A remplir par l'examineur :

Date, Nom, Prénom, Signature :

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre est conservé par l'examineur

Annexe 16 - Notice d'information et formulaire de consentement à l'étude

Annexe 17 : Données Démographiques des patients participants à l'étude

CRITERES	Participant n° ...	Participant n°...
Age		
IMC		
Antécédents		
Type d'intervention		
Activité Sportive		
Score Tegner		
Genre		
Rééducation préopératoire (OUI/NON)		
FC de repos		
FC max		

Annexe 17 - Données Démographiques des patients participants à l'étude

Annexe 18 : Score de Lyshom-Tegner pour le niveau d'activité

Prénom :

Date de l'examen : / /

Niveau d'Activité Cotation Lyshom - 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.

Annexe 18 - Score de Lyshom-Tegner pour le niveau d'activité

Issue de <http://fr.scale->

[library.com/resultat_echelle.php?echelle=Lysholm%20Score%20and%20Tegner%20Activity%20Scale&retour=liste&scalage=adulte](http://fr.scale-library.com/resultat_echelle.php?echelle=Lysholm%20Score%20and%20Tegner%20Activity%20Scale&retour=liste&scalage=adulte)

Annexe 19 : Questionnaire d'inclusion à l'étude

BFR

QUESTIONNAIRE

Nom : _____ Prénom : _____

Merci de faire remplir ce questionnaire par votre médecin, en votre présence, puis de nous le retourner pour analyse.



- 1 Avez-vous entre 18 et 40 ans ? _____
- 2 Allez-vous subir une reconstruction unilatérale du LCA ? _____
- 3 Avec quelle technique opératoire ? _____
- 4 Remplir le score Tegner Activity et noter votre niveau _____
- 5 Il y a-t-il eu moins de 6 mois entre la blessure et l'opération ? _____
- 6 Avez-vous déjà subi une rupture de ce ligament ? _____
- 7 Existe-t-il des lésions associées à cette rupture ? Si oui, précisez. _____

Avez-vous des symptômes ou des antécédents de :

- 9 Thrombose veineuse profonde ? _____
- 10 Pathologie vasculaire des membres inférieurs ? _____
- 11 Prise de médicaments anticoagulants ? _____
- 12 Chirurgie vasculaire dans le membre concerné ? _____
- 13 Pathologies cardiovasculaires graves ? _____
- 14 Hypertension artérielle sévère ? _____
- 15 Drépanocytose ? _____
- 16 Syndrome des loges ? _____
- 17 Diabète ? _____
- 18 Tabac ? _____
- 19 Obésité ? _____
- 20 Grossesse / pilule contraceptive ? _____

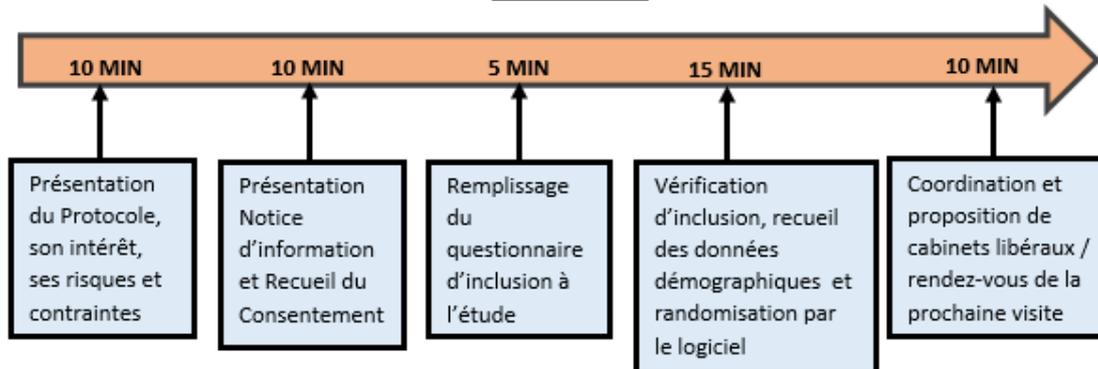
Annexe 19 - Questionnaire d'inclusion à l'étude

Annexe 20 : Déroulement Chronologique durant les visites de l'étude

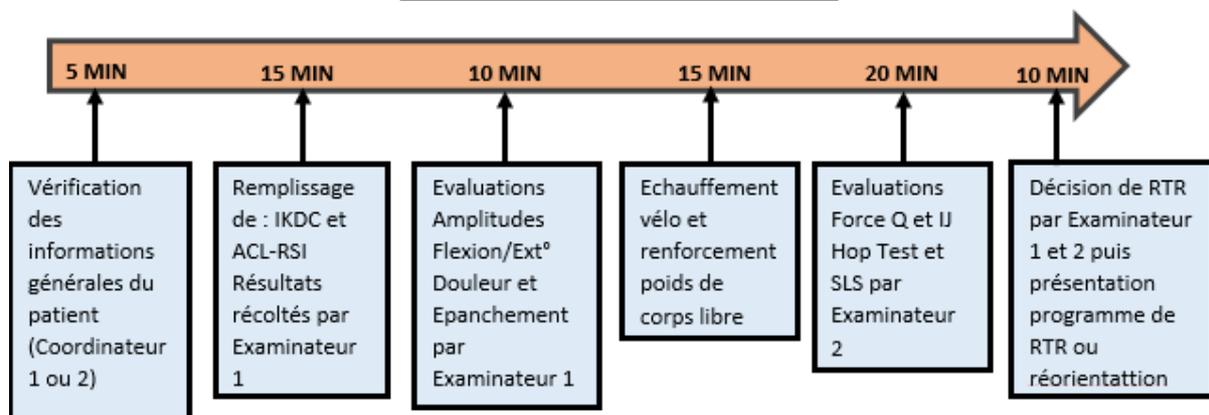
Annexe 21 : Tableau présentant le contenu des différentes visites du protocole.

Déroulement Chronologique des visites du Protocole :

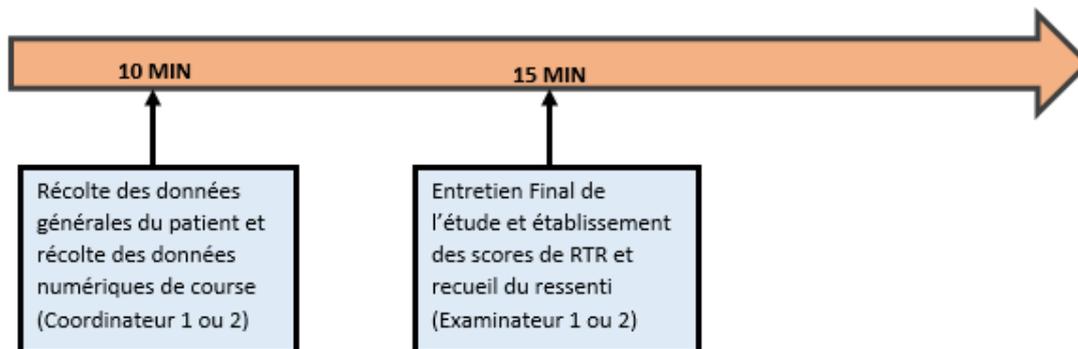
Visite Initiale :



Visite à la 14^e semaine post-opératoire :



Visite à la 16^e semaine :



Annexe 20 - Déroulement Chronologique durant les visites de l'étude

	Visite Préopératoire	Visite à 14 semaines	Visite à 16 semaines
Recrutement des patients	X		
Recueil Données Démographiques	X		
Questionnaire D'Inclusion	X		
Information et Recueil du Consentement	X	X	X
Randomisation	X		
Orientation vers un cabinet libéral	X		
Présentation commune du protocole type	X		
Questionnaires (IKDC / ACL-RSI)		X	
Batterie de test de RTR		X	
Décision du RTR		X	
Présentation / Explication programme de RTR		X	
Récolte des données de course			X
Entretien terminal des participants après RTR			X
Analyse Statistique			X

Annexe 21 - Tableau présentant le contenu des différentes visites

Annexe 22 : Présentation de l'échelle de gestion de la charge par RPE issu de
Morishita et al. (2018)

Borg CR-10 scale

Rating	Descriptor
0	Rest
1	Very, very easy
2	Easy
3	Moderate
4	Somewhat hard
5	Hard
6	–
7	Very hard
8	–
9	–
10	Maximal

Abbreviations: CR-10 = Category-Ratio 10.

Annexe 22 - Présentation de l'échelle de gestion de la charge par RPE

Issue de Morishita et al. (2018)

Annexe 23 et 24 : Score IKDC version française

Annexe 25 : Méthode de calcul pour le score IKDC inspiré de Physio tutors

Nom du patient :

Date de naissance : / /

Prénom :

Date de l'examen : / /

International Knee Documentation Committee (IKDC)

SYMPTOMES

Basez vos réponses sur le plus haut niveau d'activité que vous pensez être capable d'accomplir sans avoir de symptômes significatifs, même si vous ne faites pas actuellement ces activités.

1. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez accomplir sans souffrir du genou ?

- Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football.
- Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis.
- Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging.
- Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage.
- Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de la douleur.

2. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis votre accident/blessure, combien de fois avez-vous souffert du genou (de 0 à 10)

Jamais 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Constamment

3. Indiquez l'intensité de la douleur en cochant la case correspondante (de 0 à 10)

Aucune douleur 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 La pire douleur imaginable

4. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis l'accident/la blessure, votre genou était-il raide ou enflé ?

- Pas du tout
- Un peu
- Moyennement
- Beaucoup
- Enormément

5. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez accomplir sans que votre genou n'enfle ?

- Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage
- Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou enflé

6. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis l'accident/la blessure, y a-t-il eu un blocage ou un accrochage de votre genou ?

- Oui
- Non

Nom du patient : Date de naissance : / /

Prénom : Date de l'examen : / /

7. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez accomplir sans que votre genou ne se dérobe ?

- Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage
- Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou qui se dérobe

ACTIVITES SPORTIVES

8. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez pratiquer régulièrement ?

- Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- Activités douces comme la marche, le ménage ou le jardinage
- Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou.

9. Quelle incidence a votre genou sur votre capacité à... ?

	Pas difficile	Légèrement difficile	Très difficile	Impossible
Monter les escaliers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Descendre les escaliers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S'agenouiller (appui sur le devant du genou)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S'accroupir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S'asseoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Se lever d'une chaise	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Courir en ligne droite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sauter avec réception sur la jambe faible	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S'arrêter et repartir brusquement (marche, ou course à pied si vous êtes un athlète)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

FONCTION

10. Comment notez-vous la fonction de votre genou sur une échelle de 0 à 10 (10 correspondant au fonctionnement optimal et 0 étant l'incapacité à accomplir les activités de la vie quotidienne et sportives)

FONCTION AVANT L'ACCIDENT/LA BLESSURE DU GENOU

Performance nulle	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Performance quotidienne optimale
	<input type="checkbox"/>											

FONCTION ACTUELLE DU GENOU

Performance nulle	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Performance quotidienne optimale
	<input type="checkbox"/>											

Annexe 24 - Score IKDC version française

Un système de notation ordinal est utilisé pour attribuer un score de 0 aux réponses qui signifient le niveau le plus bas de fonction ou le niveau le plus élevé de symptômes pour chaque item. La réponse "Incapable d'effectuer l'une des activités ci-dessus en raison d'une douleur au genou" reçoit un score de 0 tandis que la réponse "Activités très éprouvantes comme le saut ou le pivotement comme au basket ou au football" reçoit un score de 4. C'est ainsi que l'item 1, qui concerne le niveau d'activité le plus élevé sans douleur significative, est noté. Pour l'item 2, qui demande la fréquence de la douleur au cours des quatre dernières semaines, les réponses "Constante" et "Jamais" reçoivent des scores de 0 et 10, respectivement.

Le formulaire d'évaluation subjective des genoux de l'IKDC est noté en additionnant les résultats des scores de chaque item, puis en convertissant le résultat sur une échelle de 0 à 100. Note : La réponse à l'item 10a, "Fonction avant la blessure au genou", n'est pas prise en compte dans le score final.

$$\text{Calcul du score IKDC : } \left[\frac{\textit{Sum of all items}}{\textit{Maximum score (87)}} \right] \times 100$$

Des scores plus élevés indiquent des niveaux plus élevés de fonction et des niveaux plus faibles de symptômes, le score transformé étant considéré comme une mesure de la fonction. Si vous avez un score de 100, cela signifie que vous n'avez aucune restriction dans vos activités quotidiennes ou sportives et que vous ne ressentez aucun symptôme.

Lorsqu'il y a des réponses à au moins 90% des items, le score du formulaire IKDC Subjective Knee peut être déterminé (c'est-à-dire lorsque des réponses ont été fournies pour au moins 16 items).

Annexe 25 - Méthode de calcul pour le score IKDC inspiré de Physio tutors

<https://www.physiotutors.com/fr/questionnaires/international-knee-documentation-committee-ikdc/>

Annexe 26 et 27 : Score ACL-RSI version française

Nom du patient :

Date de naissance : / /

Prénom :

Date de l'examen : / /

ACL RSI (Anterior Cruciate Ligament – Return to Sport and Injury)

Instructions :

Merci de répondre aux questions suivantes concernant le sport principal que vous pratiquiez avant l'accident. Pour chaque question, cochez la case entre les deux extrêmes selon ce qui vous paraît correspondre le mieux à la situation actuelle de votre genou.

1. Pensez-vous pouvoir pratiquer votre sport au même niveau qu'auparavant ?

Pas du tout sûr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Totalement sûr
	<input type="checkbox"/>											

2. Pensez-vous que vous pourriez vous blesser de nouveau le genou si vous repreniez le sport ?

Extrêmement probable	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pas du tout probable
	<input type="checkbox"/>											

3. Êtes-vous inquiet à l'idée de reprendre votre sport ?

Extrêmement inquiet	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pas du tout inquiet
	<input type="checkbox"/>											

4. Pensez-vous que votre genou sera stable lors de votre pratique sportive ?

Pas du tout sûr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Totalement sûr
	<input type="checkbox"/>											

5. Pensez-vous pouvoir pratiquer votre sport sans vous soucier de votre genou ?

Pas du tout sûr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Totalement sûr
	<input type="checkbox"/>											

6. Êtes-vous frustré de devoir tenir compte de votre genou lors de votre pratique sportive ?

Extrêmement frustré	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pas du tout frustré
	<input type="checkbox"/>											

7. Craignez-vous de vous blesser de nouveau le genou lors de votre pratique sportive ?

Crainte extrême	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Aucune crainte
	<input type="checkbox"/>											

Annexe 26 - Score ACL-RSI version française

Annexe 28 : Présentation du Sweep/Stroke Test pour l'épanchement (Sturgill et al, 2009)

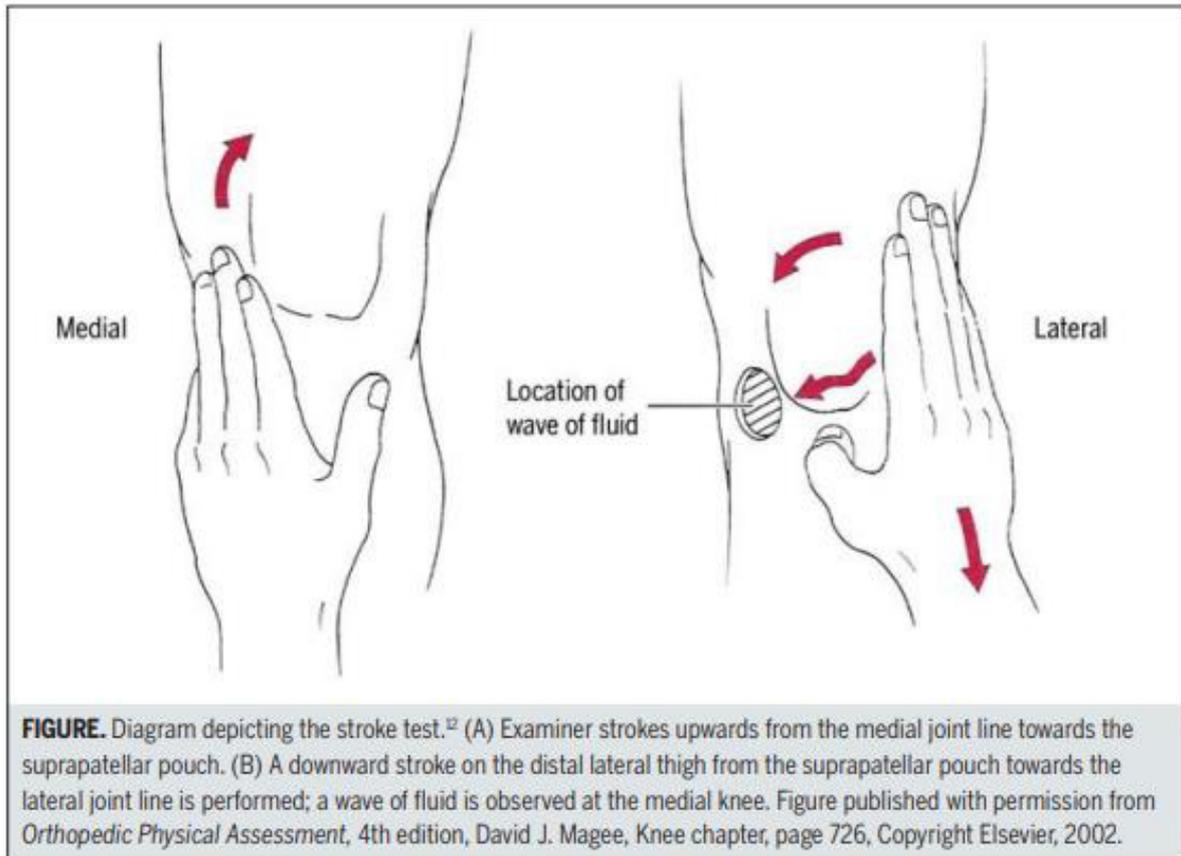


TABLE 1		EFFUSION GRADING SCALE OF THE KNEE JOINT BASED ON THE STROKE TEST	
Grade	Test Result		
Zero	No wave produced on downstroke		
Trace	Small wave on medial side with downstroke		
1+	Larger bulge on medial side with downstroke		
2+	Effusion spontaneously returns to medial side after upstroke (no downstroke necessary)		
3+	So much fluid that it is not possible to move the effusion out of the medial aspect of the knee		

Annexe 28 - Présentation du Sweep/Stroke Test pour l'épanchement

Par Sturgill et al, (2009)

Annexe 29 et 30 : Protocole d'Evaluation de la force musculaire avec dynamomètre

PROTOCOLE D'ÉVALUATION DE LA FORCE MUSCULAIRE

Nous utilisons dans cette étude, un dynamomètre portatif. Il s'agit d'un dispositif pratique qui peut être placé soit entre la main du praticien et la partie du corps testée par le patient, soit en traction attaché à un point fixe.

Bien que ce type de mesure reste moins adapté et fiable que le gold standard qu'est l'évaluation isocinétique, il a présenté une bonne fiabilité la validité dans la plupart des mesures de la force isométrique des membres inférieurs dans une population saine. (Chamorro et al., 2017 ; Mentiplay et al., 2015)

Il présente plusieurs avantages du fait de sa facilité d'utilisation et de son coût moindre. (Deones et al., 1994 ; Stark et al., 2011 ; Mentiplay et al., 2015) Le manque de fiabilité dans les mesures serait lié au manque de standardisation des protocoles d'évaluation, un mauvais positionnement des patients et un déficit de force des examinateurs. (Deones et al., 1994)

Nous avons sélectionné le dynamomètre portatif de traction DYNAMO PLUS de chez VALD® permettant de calculer la force musculaire mais aussi l'endurance de force. Il permet de calculer la capacité de force maximale et le pic de force d'un groupe musculaire. Ce dernier est simple d'utilisation avec différents interfaces. IL fournit un biofeedback acoustique et visuel en temps réel sur smartphone grâce à une application intuitive.

Toutes les informations utiles pour l'utilisation de ce dernier sont présentes dans le lien suivant : https://int.valdstore.com/en-eu/products/dynamo?selling_plan=688721887507&variant=44026338640147

Nous évaluerons la force musculaire isométrique du quadriceps et des ischio-jambiers.

A noter qu'avant la réalisation de ces tests, les patients réaliseront 10 min de vélo pour l'échauffement à intensité libre.

Evaluation Quadriceps :



Le test concerne les deux membres et démarrera par la jambe saine.

Avant de démarrer le test, les sujets auront droit à 2 essais en situation réelle mais non enregistrés.

Ensuite, les patients auront 3 contractions isométriques maximales de 4 secondes par jambe. L'application fera la moyenne des 3 répétitions. Il y aura 5 secondes de repos entre chacune des répétitions.

Le positionnement des patients est essentiel. Ils seront assis en bord de table, les pieds ne touchant pas le sol. Les mains du patient peuvent être accrochées à la table pour la stabilité. Le thérapeute place la sangle reliée au dynamomètre sur la face antéro-inférieure du tibia, juste au-dessus des malléoles. L'autre sangle attachée au dynamomètre est reliée à la table d'examen.

La hanche et le genou doivent être fléchis à 90°. Il est possible d'ajouter un coussin/serviette au niveau du tiers inférieur de la cuisse pour obtenir cet angle de 90° de flexion de hanche si nécessaire. La face postérieure du genou ne doit pas être en contact de la table.

A noter qu'il est conseillé de rajouter une sangle de stabilisation autour de la cuisse du membre testé pour la stabilisation.

Evaluation Ischio-Jambiers :

Le test concerne les deux membres et démarrera par la jambe saine.

Avant de démarrer le test, les sujets auront droit à 2 essais en situation réelle mais non enregistrés.

Ensuite, les patients auront 3 contractions isométriques maximales de 4 secondes par jambe. L'application fera la moyenne des 3 répétitions. Il y aura 5 secondes de repos entre chacune des répétitions.

Le positionnement des patients est essentiel. Ils seront positionnés en procubitus sur un tapis au sol/ou une table de soin. La sangle reliée au dynamomètre sera appliqué sur le tiers inférieur de la face postérieure de la jambe, juste au-dessus des malléoles. L'autre sangle du dynamomètre sera reliée à un point fixe (ex : espaliers).

A noter qu'il est conseillé de rajouter une sangle de stabilisation autour de la cuisse/bassin du membre testé pour la stabilisation.



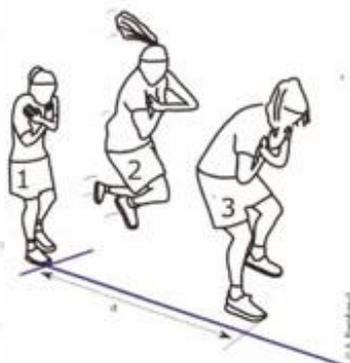
Annexe 30 - Protocole d'Evaluation de la force musculaire avec dynamomètre

Annexe 31 : Consignes de réalisation du single hop test issu d'un article de Rambaud et al (2016) et inspiré des travaux préalables de Noyes et al (1991)

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.



Alexandre RAMBAUD

Kinésithérapeute du sport
SFMKS, MSc
Laboratoire interuniversitaire de Biologie de la motricité
[LIBM EA 7424]
Saint-Étienne [42]

Pierre SAMOZINO

PhD
Laboratoire interuniversitaire de Biologie de la motricité
[LIBM EA 7424]
Université Savoie Mont-Blanc [74]

Dr Pascal EDOUARD

MD, PhD, HDR
Laboratoire interuniversitaire de Biologie de la motricité
[LIBM EA 7424]
et Unité de médecine du sport
CHU de Saint-Étienne

Mots clés :

- Bilan-diagnostic
- Ligament croisé antérieur
- Rééducation
- Tests fonctionnels

K8 n°577 - juin 2016

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.

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).

Annexe 31 - Consignes de réalisation du single hop test

Issues d'un article de Rambaud *et al.* (2016) et inspiré des travaux préalables de Noyes *et al.* (1991)

Annexe 32 : Consignes de réalisation du test single leg squat

SINGLE LEG SQUAT (SLS)

Contexte:

Diverses enquêtes sur les performances des SLS post-reconstruction du LCA ont montré de mauvaises performances chez la moitié des patients à 6 mois post-opératoires. Alors que certains patients ont présentés de mauvaises performances bilatérales, d'autres ont une asymétrie avec de meilleures performances dans le membre non opéré. Ainsi, ce test constitue un marqueur intéressant au moment de la reprise d'activité et notamment de la course pour observer la présence de déficits.



Méthodologie :

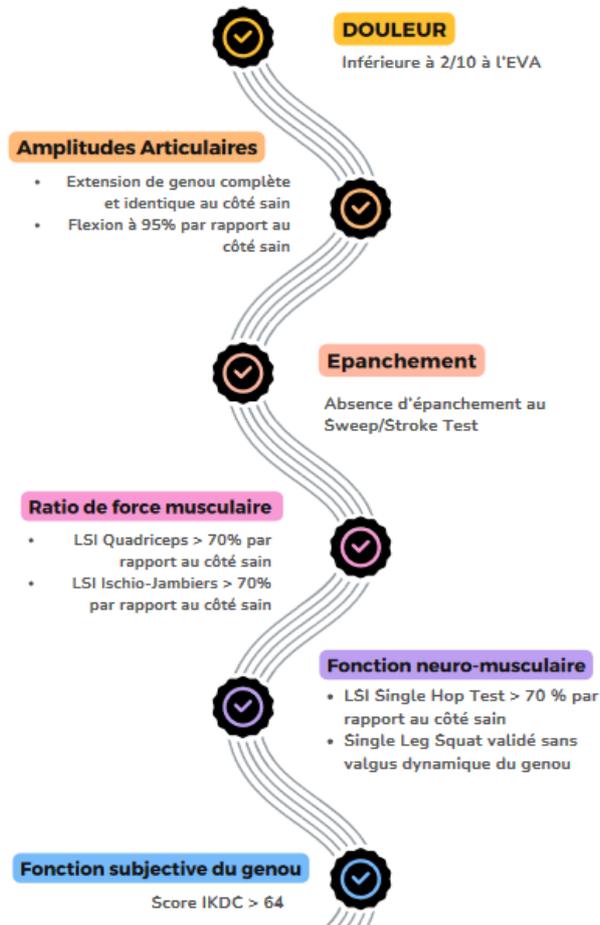
Après avoir réalisé un échauffement au vélo de 10 minutes, les sujets auront le droit à 3 tests par jambe avant l'évaluation.

- Les sujets placeront le pied de la jambe à tester sur une ligne tracée au sol, juste devant une box d'une hauteur de 60 cm.
- Le membre non testé sera élevé du sol avec une flexion de hanche à 45° et de genou à 90° environ.
- Les mains du sujet seront placées sur ses hanches.
- Après avoir réalisé 3 tests libres par jambe, les sujets auront 3 essais par jambe pour réussir le squat unipodal. Le meilleur des 3 essais sera retenu pour l'évaluation.
- L'exécution correcte du squat comporte une descente sans compensation, au niveau du genou (valgus), au niveau du bassin ou du tronc (inclinaison) et sans que la jambe opposée ne touche le sol. Le tout dans l'amplitude complète attendue.
- Une caméra sera placée devant le sujet avec une prise du corps en entier afin d'évaluer les possibles déviations dans le plan frontal.
- Le sujet doit descendre jusqu'à toucher la box avec ses fesses et remonter immédiatement.
- Au cours des 3 réalisations par jambe, l'examineur évalue si le patient est capable de réaliser le squat, mais aussi si des compensations existent et surtout si un déficit majeur existe par rapport au côté opposé.

Annexe 32 - Consignes de réalisation du test single leg squat

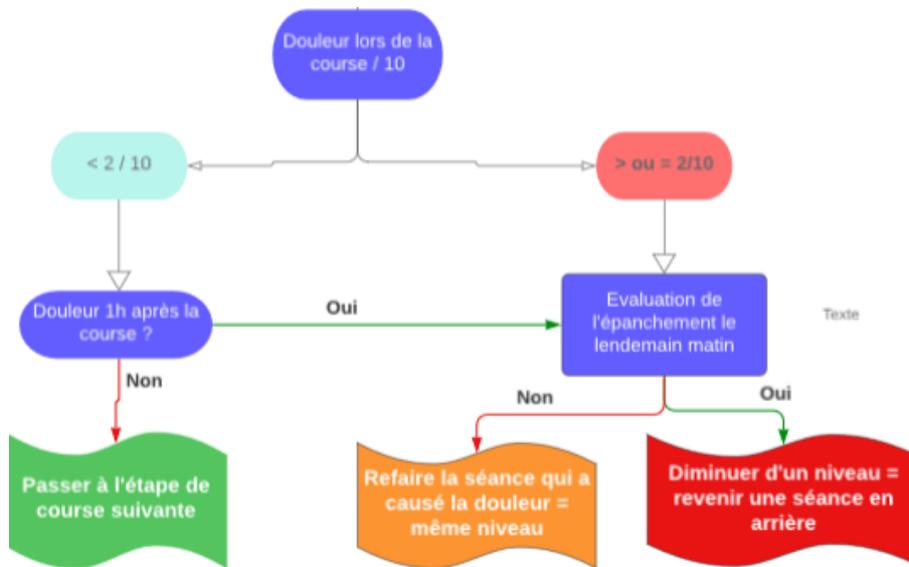
Annexe 33 : Critères autorisant le RTR pour les patients

RTR autorisé si...



Annexe 33 - Critères autorisant le RTR pour les patients

Annexe 34 : Algorithme décisionnel pendant le RTR



Annexe 34 - Algorithme décisionnel pendant le RTR

Annexe 35 : Fiche conseil pour l'auto-évaluation de l'épanchement par les patients
lors de la réalisation du RTR

Fiche d'Auto-Evaluation

Épanchement



Après chaque séance de course, en plus d'évaluer la douleur, il vous faudra évaluer la présence d'un épanchement du genou ou non. Voici une fiche pour vous guider dans cette réalisation.

Noter cependant qu'en cas de doute ou de problème, vous pouvez contacter notre équipe pour une visio.

- **Aspect visuel : est-ce que votre genou vous paraît plus volumineux par rapport au côté opposé ?**
- **Aspect palpatoire : toucher votre genou avec le dos de votre main. Vous paraît-il plus chaud que le côté opposé ?**
- **Sensations : depuis le réveil, ressentez-vous une sensation de lourdeur/gonflement dans votre jambe ?**

Si l'un de ses éléments est présent, vous avez probablement un épanchement. En fonction de votre douleur, reprenez l'organigramme qui vous a été fourni et adaptez la suite de votre programme de reprise de course en conséquence.

Source image : <https://www.genou.eu/les-pathologies/le-genou/syndrome-rotulien/>

Annexe 35 - Fiche conseil pour l'auto-évaluation de l'épanchement par les patients lors de la réalisation du RTR

Annexe 36 : Impact des ischio-jambiers sur différentes vitesses de course (Dorn et al., 2012)

Annexe 37 : Durée d'activation des ischio-jambiers pendant la course (Hanon et al, 2005)

Table 2. Mean (\pm s.d.) magnitudes of stride length, stride frequency, ground contact time, peak muscle forces and peak muscle contributions to the vertical ground reaction force

Variable	Speed 1	Speed 2	Speed 3	Speed 4
	3.49 \pm 0.12 m s ⁻¹ (N=9)	5.17 \pm 0.13 m s ⁻¹ (N=9)	6.96 \pm 0.13 m s ⁻¹ (N=8)	8.99 \pm 0.67 m s ⁻¹ (N=7)
Stride characteristics				
Stride length (m)	2.62 \pm 0.10 ^{b,c,d}	3.42 \pm 0.13 ^{a,c,d}	3.99 \pm 0.22 ^{a,b}	4.10 \pm 0.26 ^{a,b}
Stride frequency (s ⁻¹)	1.31 \pm 0.03 ^{b,c,d}	1.47 \pm 0.05 ^{a,c,d}	1.75 \pm 0.10 ^{a,b,d}	2.18 \pm 0.10 ^{a,b,c}
Ground contact time (s)	0.243 \pm 0.022 ^{b,c,d}	0.188 \pm 0.015 ^{a,c,d}	0.145 \pm 0.009 ^{a,b,d}	0.118 \pm 0.011 ^{a,b,c}
Peak forces developed by muscles (BW)				
ILPSO (swing)	1.97 \pm 0.37 ^{b,c,d}	3.49 \pm 0.51 ^{a,c,d}	5.91 \pm 0.98 ^{a,b,d}	9.04 \pm 1.71 ^{a,b,c}
GMAX (swing)	0.38 \pm 0.12 ^{b,c,d}	0.64 \pm 0.17 ^{a,c,d}	1.03 \pm 0.29 ^{a,b,d}	2.22 \pm 0.60 ^{a,b,c}
HAMS (swing)	2.10 \pm 0.38 ^{b,c,d}	2.66 \pm 0.31 ^{a,c,d}	4.61 \pm 0.74 ^{a,b,d}	8.95 \pm 1.66 ^{a,b,c}
RF (swing)	0.67 \pm 0.06 ^{b,c,d}	1.19 \pm 0.17 ^{a,c,d}	1.81 \pm 0.28 ^{a,b,d}	2.80 \pm 0.39 ^{a,b,c}
VAS (stance)	4.70 \pm 0.57	5.35 \pm 1.21	4.93 \pm 0.94	4.89 \pm 0.89
GAS (stance)	1.94 \pm 0.25 ^{b,c,d}	2.65 \pm 0.44 ^{a,c}	3.23 \pm 0.49 ^{a,b}	2.97 \pm 0.34 ^a
SOL (stance)	6.70 \pm 0.66 ^{b,c,d}	7.92 \pm 0.82 ^{a,c,d}	8.71 \pm 0.83 ^{a,b,d}	7.34 \pm 0.72 ^{a,b,c}
TIBANT (swing)	0.17 \pm 0.14 ^d	0.22 \pm 0.16 ^d	0.31 \pm 0.10 ^d	0.50 \pm 0.11 ^{a,b,c}
Peak muscle contributions to the vertical ground force (BW)				
VAS	1.12 \pm 0.26	1.02 \pm 0.29	0.92 \pm 0.23	0.74 \pm 0.21
GAS	0.53 \pm 0.10 ^{b,c,d}	0.73 \pm 0.16 ^a	0.81 \pm 0.12 ^a	0.74 \pm 0.06 ^a
SOL	1.61 \pm 0.32 ^{b,c,d}	1.98 \pm 0.53 ^a	2.40 \pm 0.55 ^a	2.30 \pm 0.59 ^a
Total vertical ground force	2.71 \pm 0.46 ^{b,c,d}	3.14 \pm 0.55 ^{a,c,d}	3.58 \pm 0.67 ^{a,b}	3.59 \pm 0.71 ^{a,b}
Mechanical work produced by hip muscles in swing phase (J kg⁻¹)				
ILPSO (1st half of swing)	0.36 \pm 0.07 ^{b,c,d}	0.64 \pm 0.08 ^{a,c,d}	0.85 \pm 0.09 ^{a,b,d}	1.12 \pm 0.17 ^{a,b,c}
RF (1st half of swing)	-0.11 \pm 0.02 ^{b,c,d}	-0.21 \pm 0.04 ^{a,c,d}	-0.31 \pm 0.04 ^{a,b,d}	-0.41 \pm 0.05 ^{a,b,c}
GMAX (2nd half of swing)	0.07 \pm 0.02 ^{b,c,d}	0.19 \pm 0.06 ^{a,c,d}	0.43 \pm 0.08 ^{a,b,d}	0.77 \pm 0.11 ^{a,b,c}
HAMS (2nd half of swing)	-0.27 \pm 0.04 ^{b,c,d}	-0.53 \pm 0.12 ^{a,c,d}	-0.95 \pm 0.15 ^{a,b,d}	-1.75 \pm 0.31 ^{a,b,c}

Forces are normalised by body weight (BW) and mechanical work is normalised by body mass. Positive work represents energy generation; negative work represents energy absorption. Grey shaded rows indicate variables that displayed significant changes in absolute magnitude for all running speed increments.

ILPSO, iliacus and psoas combined; GAS, medial and lateral compartments of gastrocnemius combined; GMAX, superior, middle and inferior gluteus maximus; HAMS, biceps femoris long head, semimembranosus and semitendinosus combined; RF, rectus femoris; SOL, soleus; TIBANT, tibialis anterior; VAS, vastus medialis, vastus intermedius and vastus lateralis combined.

^aSignificantly different from running speed 1 ($P < 0.01$).

^bSignificantly different from running speed 2 ($P < 0.01$).

^cSignificantly different from running speed 3 ($P < 0.01$).

^dSignificantly different from running speed 4 ($P < 0.01$).

Annexe 36 - Impact des ischio-jambiers sur différentes vitesses de course

Par Dorn et al. (2012)

Tableau 1. Évolution des niveaux et durées d'activité avec la vitesse

FVM = Force Volontaire Maximale : niveau d'activation maximal recueilli en mode isométrique.

Tous résultats : Hanon et al. (sous presse), à l'exception de GM (Montgomery et al., 1994) pour des enregistrements à 15 km.h⁻¹.

Muscle	Niveau d'activité (NA) (en % de FVM)		Durée d'activité (DA) (en % de la durée totale du cycle)	
	13 km.h ⁻¹	21 km.h ⁻¹	13 km.h ⁻¹	21 km.h ⁻¹
BF	44	62	66	75
Ga	46	56	42	38
RF	21	36	40	56
VL	40	60	33	30
TA	37	42	85	90
GM	20 (15 km.h ⁻¹)	-	25 (15 km.h ⁻¹)	-

Annexe 37 - Durée d'activation des ischio-jambiers pendant la course

Issue de Hanon et al. (2005)

Annexe 38 : Tableau présentant les principales différences dans le protocole proposé entre notre mémoire et celui de Jaffredo. (2020)

	Mémoire Jaffredo (2020)	Notre Mémoire
Problématique	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 ?	Dans quelle mesure l'utilisation du Blood Flow Restriction permet-elle d'optimiser les critères physiques et psychologiques des patients lors du retour à la course dans un contexte de rééducation post-opératoire du LCA ? Proposition d'un protocole pour un essai contrôlé randomisé
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<p>-</p> <p>La rééducation avec BFR permet de valider un plus grand nombre de critères susceptibles de favoriser la reprise de la course par rapport à une rééducation standard. La réussite d'un programme de réintroduction de la course en autonomie est favorisée par la rééducation post-opératoire avec BFR.</p> <p>Les patients ayant eu une rééducation avec BFR auront moins d'appréhension psychologique et une meilleure confiance en leur genou au moment de reprendre la course (des scores ACL-RSI et IKDC plus importants).</p>
Critères d'inclusion	<ul style="list-style-type: none"> - Donner leur consentement à l'écrit, après avoir reçu une information claire et loyale <ul style="list-style-type: none"> - 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) 	<ul style="list-style-type: none"> - Patients entre 18 et 40 ans - Rupture unilatérale du LCA avec reconstruction - Démarrer la rééducation dans les 2 semaines post-opératoire - Avoir moins de 6 mois entre opération et rupture <ul style="list-style-type: none"> - Score Tegner entre 4 et 7
Application du BFR	Système de tourniquet personnalisé LOP à 50% puis augmenté de 10% jusqu'à atteindre 80%	Système automatisé MadUp LOP fixée à 80%
Déroulement global de l'étude	Protocole sur 12 semaines qui démarre dès la première semaine post-opératoire. Le groupe contrôle ne réalise pas le même renforcement musculaire	Protocole sur 14 semaines qui démarre dans les 2 semaines post-opératoire.
Détails du protocole	Phase précoce (une semaine) Lever d'inhibition du quadriceps avec écrase coussin 2 x (30/15/15/15)	Phase précoce (4 semaines) : Travail de lever d'inhibition du quadriceps avec contraction flash et en endurance 4 fois par semaine 3 x 5min de contractions Puis travail de contraction en charge debout et travail de marche sous BFR
	A partir de 2-3 semaines : quand activation quadriceps et flexion 0-90° OK :	

	Travail de leg press unipodale 4x (30/15/15/15) à 30% 1RM	A partir d'1 mois : travail 2 séances par semaines d'interval training sur ergocycle avec BFR + 2 séances par semaine d'hypertrophie avec 4 exercices (fentes, presse, leg extension, pont fessier) en 30/15/15/15
	De la 4 ^e à la 12 ^e semaine : Leg Extension 4x (30/15/15/15) 30% 1RM Amplitudes et Charges Progressives	De la 9 ^e à la 14 ^e semaine : 2 séances par groupe musculaire (quadri et ischios) par semaines avec 4 exercices différents en 30/15/15/15 à chaque fois avec charges progressives
Charge utilisé	1 RM mesuré en préopérateur	1 RM de la jambe controlatérale et/ou échelle RPE
Volume d'entraînement	3 séances la première semaine puis 2 par semaines = 25 sessions au total	4 séances par semaine 64 sessions au total
Critères de jugement principaux	LSI fonctionnel (hop test) et LSI force musculaire Pour pouvoir réaliser les tests il faudra avoir un score de Lysholm > à 83 = sinon empêche de passer les évaluations	Score IKDC (prouvé comme étant prédicteur du retour à la course en 2022)
Critères de jugement secondaires	AUCUN	- - Batterie de Rambaud et al (Douleur, épanchement, amplitudes, LSI force, LSI hop test, LSI squat unipodal) - Score ACL-RSI - Réalisation pratique d'un programme de réintroduction de la course
Reprise de course autorisée si	Score de Lysholm > 83 LSI hop test > 85% LSI force quadriceps > 80%	Score IKDC > 64 Douleur < 2 / Pas d'épanchement Score LSI ischio-jambiers et quadriceps > 75% LSI Single hop test 70% Squat unipodal validé sans valgus dynamique
Intérêts de l'étude	Observer si le BFR permet d'atteindre les critères de reprise de course	IDEM + élargissement avec la sphère bio-psycho-sociale en incluant plus de critères dans l'analyse et la décision du retour à la course mais aussi en évaluant à viser exploratoire l'impact pratique et pas seulement sur des critères de reprise.

Annexe 38 - Tableau présentant les principales différences dans le protocole proposé entre notre mémoire et celui de Jaffredo. (2020)

Annexe 39 : Tableau présentant les différents protocoles de plusieurs études ayant utilisé l'exercice avec BFR et ayant le score IKDC comme critère de jugement

	Durée et début du Programme	Nombre de participants	Inclusion	Protocole	Application BFR	Critères évalués	Résultats
Hugues et al. (2019)	2x / sem sur 8 semaines - Début 2 semaines après ACLR	28 (14 groupe BFR + faible charge VS 14 groupe exercice haute charge)	Opéré avec DIDT	Presse unilatérale sur chaque jambe à 30% 1RM (+ 10% dès que le patient réussi toutes les reps sur 2 sessions de suite) et des exercices à faire 3 x / sem à domicile 4 sets de (30/15/15/15) reps VS 3x 10 reps à 70% 1RM pour le groupe contrôle	80% LOP	Force isométrique max (10RM) Hypertrophie vaste latéral Fonction auto-déclarée Test d'équilibre Douleur Epanchement Amplitudes Laxité Force isocinétique en extension et en flexion de genou	Force Musculaire et Hypertrophie similaire au groupe à haute charge / Fonction subjective + Douleur + Epanchement > dans le groupe BFR
Curran et al. (2020)	2x / sem sur 8 semaines – Début 10 semaines après ACLR	34 patients répartis dans 4 groupes (concentrique / excentrique / concentrique + BFR / excentrique + BFR)	14-30ans Pas de lésions associées et de contre-indications au BFR	Presse isocinétique unilatérale à 70% 1RM en concentrique ou excentrique 4 séries de 10 répétitions	80% LOP	Le moment de force du quadriceps isométrique et isocinétique (60 deg/s), l'activation du muscle quadriceps, le score IKDC et le volume du droit fémoral ont été évalués en pré-op, en post-op, après utilisation du BFR et au moment où les patients retournent à l'activité.	Aucune différence significative n'a été constatée entre les groupes pour les mesures des résultats à tous les points d'évaluation
Okoroha et al. (2023)	2 semaines préopératoires et 2 à 3 x / semaines sur 12 semaines post-opératoires (début à 3 jours après ACLR)	46 patients (22 groupe BFR et 24 groupe contrôle)	> à 14 ans Pris en charge dans les mois après blessure	Plusieurs exercices divers de renforcement sans charge. Protocole 30/15/15/15 reps	80% LOP	LSI force du quadriceps Fonction auto-déclarée Amplitudes Articulaires Circonférence Quadriceps A 6 semaines, 3 et 6 mois après ACLR.	Augmentation significative force et fonction auto-déclarée groupe BFR à 6 semaines. Aucune différence à 3 et 6 mois.

	Durée et début du Programme	Nombre de participants	Inclusion	Protocole	Application BFR	Critères évalués	Résultats
Roman et al. (2020)	12 premières semaines après ACLR	12-18 ans ACLR avec TQ	32 patients	2 fois par semaines 30/15/15/15 - 20-30% 1RM (adaptation avec l'échelle de RPE à 7) 3 exercices (quadriceps, fessiers, IJ) avec BFR par séances et variation des exercices toutes les 2 semaines.	80% (ou 60% si nécessaire)	Force isométrique des fléchisseurs et extenseurs Score Pedi-IKDC (à 3 mois) Force isocinétique (au moment du RTP)	Moment de force isométrique en extension Et score Pedi-IKDC à 3 mois et au RTP significativement meilleurs

Annexe 39 - Tableau présentant les différents protocoles de plusieurs études ayant utilisé l'exercice avec BFR et ayant le score IKDC comme critère de jugement

Annexe 40 : Tableau présentant les protocoles de différentes études utilisant l'exercice avec BFR et s'intéressant aux adaptations musculaires

	Durée et début du Programme	Nombre de participants	Inclusion	Protocole groupe intervention	Application BFR	Critères évalués	Résultats
Hugues et al. (2019) - Curran et al. (2020) – Roman et al. (2020) - Okorooha et al. (2023)	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent	CF Tableau précédent
Erickson et al. (2019)	3 x / semaines sur 4 semaines en préopératoire 3 x / semaines sur 6-7 mois	60 - Un groupe BFR + exercice et un groupe placebo + BFR	15 – 40 ans TAS > 5	Plusieurs exercices variés avec un protocole évolutif en fonction des phases de rééducation. Utilisation de l'échelle RPE pour quantifier la difficulté de l'exercice.	Pression minimale dans le groupe contrôle 20 min/séance	Force du genou (pic et moment de force) Biomécanique du genou Morphologie et Physiologie du quadriceps	Pas encore mis en place
Iversen et al. (2016)	Début le 2 ^e jour post-op, arrêt le 14 ^e jour post-op 2 séances par jour	24 participants répartis dans un groupe occlusion et un groupe contrôle	18-40 ans ACLR avec DIDT	5 min d'occlusion puis 3 min de relâchement avec des exercices de quadri pendant l'occlusion. 20 répétitions / 5 fois	Entre 130 et 180mmHg	Changement dans la section transversale du quadriceps par IRM	Pas de différence entre les groupes pour l'atrophie du quadriceps
Ohta et al. (2003)	Durant les 16 semaines post-op avec début du BFR à la 2 ^e semaine BFR utilisé 2 x / j et 6 x / semaines sur la période de 1 à 8 semaine	44 participants (un groupe exercice avec occlusion et un groupe exercice seul)	18 – 52 ans ACLR avec DIDT	Plusieurs exercices de renforcement du quadriceps et des exercices fonctionnels en fonction des phases. Avec du maintien isométrique et 20 répétitions	180 mmHg	Evaluation isocinétique et isométrique de la force Section transversale du quadriceps Diamètre des différents types de fibres musculaires Comparaison pré-op / post intervention (16 semaines)	Amélioration de force des fléchisseurs et extenseurs Amélioration de la section transversale du quadriceps

	Durée et début du Programme	Nb de sujets	Inclusion	Protocole groupe intervention	Application BFR	Critères évalués	Résultats
Takarada et al. (2000)	Du 3 ^e au 14 ^e jour post-opératoire	16	>18 ans	2 séances par jour avec 5 min d'occlusion avec 3 min de relâchement entre. 5 fois par séance.	180 mmHg avec des augmentations de 10mmhg	Changement dans la section transversale des muscles de la cuisse entre le 3 ^e et le 14 ^e jour post-op	Diminution de la section transversale de 20 (ext) et 11% (flex) dans le groupe contrôle contre 9% dans le groupe intervention. ➤ Diminue atrophie
Kilgas et al. (2019)	Début 5 (+/-2) ans après ACLR Intervention sur 4 semaines	18	ACLR > 2 ans Rééducation préopératoire RTP validé LSI > 10% force ext	Exercice à la maison 5x / semaines. 3 x 30 leg extension 3 x 30 half squat (0-45°) 3 x 2 min de marche Tout au poids de corps	50% LOP	L'épaisseur du droit fémoral et du vaste latéral et la force de l'extenseur du genou ont été mesurées avant et après l'entraînement	Amélioration significative de tous les critères de jugement
Abe et al. (2005)	2x/jour sur 8 jours	15	Athlètes masculins	Squats et Leg Curl à 20% 1RM 3*15 reps. Les 2 groupes faisaient en plus l'entraînement de sprint et saut	160 (+ 20mmHg / j)	Performance au sprint et au saut Force Maximale Q et IJ Section transversale Circonférence de la cuisse	Amélioration significative de tous les critères évoqués sauf la performance aux sauts.
Scott et al. (2017)	5 semaines	21	Footballeurs semi pro australiens	Entraînement à haute charge classique + squats à charge légère avec ou sans BFR selon le groupe 3 x / semaines 30/15/15/15 20-30%1RM	Pression ressentie par le patient à 7/10	Endurance et 3RM au squat Performance sauts et sprints Architecture muscu Q	Aucune différence significative entre les 2 groupes sur l'ensemble des points
Takarada et al. (2002)	8 semaines	17	Joueurs de rugby dans l'élite	4 sets de leg extension isocinétique jusqu'à l'échec 2 fois par semaine 50% 1RM	196mmHg	Force isométrique et isocinétique Endurance musculaire Variation section transversale Q et IJ à l'IRM	Tout était significativement meilleur dans le groupe BFR sauf la section transversale des IJ

	Durée et début du Programme	Nb de sujets	Inclusion	Protocole groupe intervention	Application BFR	Critères évalués	Résultats
Bowman et al. (2019)	6 semaines	26	Sujets sains Sportifs loisirs 20-40 ans	2 x / semaines Plusieurs exercices de flexion de hanche, de genou, d'extension de genou et d'abduction de hanche 30% 1RM (RPE 7-8) - 30/15/15/15	80% LOP	Force isocinétique quadri et IJ Force isométrique ABD et EXT de hanche, flexion plantaire. Circonférence cuisse	Amélioration significative de tous les critères dans le groupe BFR. Augmentations plus importantes de la force, de l'hypertrophie et de l'endurance pour les muscles proximaux et distaux
Teixeira et al. (2021)	8 semaines	49	Sujets sains et non entraînés	2 x / semaines 3 x 8 répétitions à 70% 1RM de leg extension	80% LOP au repos	Contraction Volontaire Maximale Isométrique (MVIC) 1RM Section transversale Quadriceps Concentration sanguine en lactate	Effets similaires sur la force et l'hypertrophie entre le groupe haute charge et le groupe avec BFR et haute charge

Annexe 40 - Tableau présentant les protocoles de différentes études utilisant l'exercice avec BFR et s'intéressant aux adaptations musculaires

Annexe 41 : Recommandations et grades des preuves pour l'entraînement par l'American College of Sports Medicine, 2009.

Annexe 42 : Recommandations d'entraînement en hypertrophie par Schoenfeld et al (2021)

Annexe 43 : Recommandations d'utilisation du BFR (Patterson et al., 2019)

TABLE 2. Summary of progressive resistance training recommendations.

Evidence Statement	Grade
Strength training	
CON, ECC, and ISOM actions be included for novice, intermediate, and advanced training.	A
Training with loads ~60–70% of 1 RM for 8–12 repetitions for novice to intermediate individuals and cycling loads of 80–100% of 1 RM for advanced individuals.	A
When training at a specific RM load, it is recommended that a 2–10% increase in load be applied when the individual can perform the current workload for 1–2 repetitions over the desired number on two consecutive training sessions.	B
It is recommended that 1–3 sets per exercise be used by novice individuals.	A
Multiple-set programs (with systematic variation of volume and intensity) are recommended for progression to intermediate and advanced training.	A
Unilateral and bilateral single- and multiple-joint exercises should be included with emphasis on multiple-joint exercises for maximizing strength in novice, intermediate, and advanced individuals.	A
Free-weight and machine exercises should be included for novice to intermediate training.	A
For advanced strength training, it is recommended that emphasis be placed on free-weight exercises with machine exercises used to complement program needs.	C
Recommendations for sequencing exercises for novice, intermediate, and advanced strength training include large muscle group exercises before small muscle group exercises, multiple-joint exercises before single-joint exercises, higher-intensity exercises before lower-intensity exercises, or rotation of upper and lower body or opposing exercises.	C
It is recommended that rest periods of at least 2–3 min be used for core exercises using heavier loads for novice, intermediate, and advanced training. For assistance exercises, a shorter rest period length of 1–2 min may suffice.	B
For untrained individuals, it is recommended that slow and moderate CON velocities be used.	C
For intermediate training, it is recommended that moderate CON velocity be used.	A
For advanced training, the inclusion of a continuum of velocities from unintentionally slow to fast CON velocities is recommended and should correspond to the intensity.	A
It is recommended that novice individuals train the entire body 2–3 d·wk ⁻¹ .	C
It is recommended that for progression to intermediate training, a frequency of 3–4 d·wk ⁻¹ be used (based on how many muscle groups are trained per workout).	B
It is recommended that advanced lifters train 4–6 d·wk ⁻¹ .	C
Muscle hypertrophy	
It is recommended that CON, ECC, and ISOM muscle actions be included.	A
For novice and intermediate training, it is recommended that moderate loading be used (70–85% of 1 RM) for 8–12 repetitions per set for 1–3 sets per exercise.	A
For advanced training, it is recommended that a loading range of 70–100% of 1 RM be used for 1–12 repetitions per set for 3–6 sets per exercise in a periodized manner such that the majority of training is devoted to 6–12 RM and less training devoted to 1–6 RM loading.	A
It is recommended that single- and multiple-joint free-weight and machine exercises be included in novice, intermediate, and advanced individuals.	A
For exercise sequencing, an order similar to strength training is recommended.	C
It is recommended that 1- to 2-min rest periods be used in novice and intermediate training; for advanced training, length of rest period should correspond to the goals of each exercise such that 2- to 3-min rest periods may be used with heavy loading for core exercises and 1–2 min may be used for other exercises of moderate to moderately high intensity.	C
It is recommended that slow to moderate velocities be used by novice- and intermediate-trained individuals; for advanced training, it is recommended that slow, moderate, and fast repetition velocities be used depending on the load, repetition number, and goals of the particular exercise.	C
It is recommended that a frequency of 2–3 d·wk ⁻¹ be used for novice training.	A
For intermediate training, the recommendation is similar for total-body workouts or 4 d·wk ⁻¹ when using an upper/lower body split routine.	B
For advanced training, a frequency of 4–6 d·wk ⁻¹ is recommended.	C
Muscle power	
The use of predominately multiple-joint exercises performed with sequencing guidelines similar to strength training is recommended for novice, intermediate, and advanced power training.	B
It is recommended that concurrent to a typical strength training program, a power component is incorporated consisting of 1–3 sets per exercise using light to moderate loading (30–60% of 1 RM for upper body exercises, 0–60% of 1 RM for lower body exercises) for 3–6 repetitions not to failure.	A
Various loading strategies are recommended for advanced training. Heavy loading (85–100% of 1 RM) is necessary for increasing force and light to moderate loading (30–60% of 1 RM for upper body exercises, 0–60% of 1 RM for lower body exercises) performed at an explosive velocity is necessary for increasing fast force production.	B
A multiple-set (3–6 sets) power program be integrated into a strength training program consisting of 1–6 repetitions in a periodized manner is recommended.	A
Rest periods of at least 2–3 min between sets for core exercises are recommended when intensity is high. For assistance exercises and those of less intensity, a shorter rest interval (1–2 min) is recommended.	D
The recommended frequency for novice power training is similar to strength training (2–3 d·wk ⁻¹).	A
For intermediate power training, it is recommended that either a total-body or upper/lower-body split workout be used for a frequency of 3–4 d·wk ⁻¹ .	C
For advanced power training, a frequency of 4–5 d·wk ⁻¹ is recommended using predominantly total-body or upper/lower-body split workouts.	C
Local muscular endurance	
It is recommended that unilateral and bilateral multiple- and single-joint exercises be included using various sequencing combinations for novice, intermediate, and advanced local muscular endurance training.	A
For novice and intermediate training, it is recommended that relatively light loads be used (10–15 repetitions) with moderate to high volume.	A
For advanced training, it is recommended that various loading strategies be used for multiple sets per exercise (10–25 repetitions or more) in a periodized manner leading to a higher overall volume using lighter intensities.	C
It is recommended that short rest periods be used for muscular endurance training, e.g., 1–2 min for high-repetition sets (15–20 repetitions or more), less than 1 minute for moderate (10–15 repetitions) sets. For circuit weight training, it is recommended that rest periods correspond to the time needed to get from one exercise station to another.	C
Low frequency (2–3 d·wk ⁻¹) is effective in novice individuals when training the entire body.	A
For intermediate training, 3 d·wk ⁻¹ is recommended for total-body workouts and 4 d·wk ⁻¹ is recommended for upper/lower body split routine workouts.	C
For advanced training, a higher frequency may be used (4–6 d·wk ⁻¹) if muscle group split routines are used.	B
It is recommended that intentionally slow velocities be used when a moderate number of repetitions (10–15) are used.	C
If performing a large number of repetitions (15–25 or more), then moderate to faster velocities are recommended.	B
Motor performance	
It is recommended that multiple-joint exercises be performed using a combination of heavy and light to moderate loading (using fast repetition velocity) with moderate to high volume in periodized fashion 4–6 d·wk ⁻¹ for maximal progression in vertical jumping ability. The inclusion of plyometric training (explosive form of exercise involving various jumps) in combination with resistance training is recommended.	B
It is recommended that the combination of heavy resistance and ballistic resistance exercise (along with sprint and plyometric training) be included for progression in sprinting ability.	B
Older adults	
For further improvements in strength and hypertrophy in older adults, the use of both multiple- and single-joint exercises (free weights and machines) with slow-to-moderate lifting velocity, for 1–3 sets per exercise with 60–80% of 1 RM for 8–12 repetitions with 1–3 min of rest in between sets for 2–3 d·wk ⁻¹ is recommended.	A
Increasing power in healthy older adults include: 1) training to improve muscular strength, and 2) the performance of both single- and multiple-joint exercises for 1–3 sets per exercise using light to moderate loading (30–60% of 1 RM) for 6–10 repetitions with high repetition velocity.	B
Similar recommendations may apply to older adults as young adults, e.g., low to moderate loads performed for moderate to high repetitions (10–15 or more) for enhancing muscular endurance.	B

Annexe 41 - Recommandations et grades des preuves pour l'entraînement

Par l'American College of Sports Medicine, 2009.

Table 1. Summary of Consensus Recommendations

Variable	CONSENSUS RECOMMENDATION
LOAD	<ul style="list-style-type: none"> • Individuals can achieve comparable muscle hypertrophy across a wide spectrum of loading zones. • There may be a practical benefit to prioritizing the use of moderate loads for the majority of sets in a hypertrophy-oriented training program. • Preliminary evidence suggests a potential hypertrophic benefit to employing a combination of loading ranges. This can be accomplished through a variety of approaches, including varying repetition ranges within a session from set to set, or by implementing periodization strategies with specific 'blocks' devoted to training across different loading schemes.
VOLUME	<ul style="list-style-type: none"> • A dose of approximately 10 sets per muscle per week would seem to be a general minimum prescription to optimize hypertrophy, although some individuals may demonstrate a substantial hypertrophic response on somewhat lower volumes. • Evidence indicates potential hypertrophic benefits to higher volumes, which may be of particular relevance to underdeveloped muscle groups. • Although empirical evidence is lacking, there may be a benefit to periodizing volume to increase systematically over a training cycle. • It may be prudent to limit incremental increases in the number of sets for a given muscle group to 20% of an athlete's previous volume during a given training cycle (~4 weeks) and then readjust accordingly.
FREQUENCY	<ul style="list-style-type: none"> • Significant hypertrophy can be achieved when training a muscle group as infrequently as once per week in lower to moderate volume protocols; there does not seem to be a hypertrophic benefit to greater weekly per-muscle training frequencies provided set volume is equated. • It may be advantageous to spread out volume over more frequent sessions when performing higher volume programs. A general recommendation would be to cap per-session volume at ~10 sets per muscle and, when applicable, increase weekly frequency to distribute additional volume.
REST INTERVAL	<ul style="list-style-type: none"> • As a general rule, rest periods should last at least 2 minutes when performing multi-joint exercises. • Shorter rest periods (60-90 secs) can be employed for single-joint and certain machine-based exercises.
EXERCISE SELECTION	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertrophy-oriented RT programs should include a variety of exercises that work muscles in different planes and angles of pull to ensure complete stimulation of the musculature. • Programming should employ a combination of multi- and single-joint exercises to maximize whole muscle development. Where applicable, focus on employing exercises that work muscles at long lengths. • Free-weight exercises with complex movement patterns should be performed regularly to reinforce motor skills. Alternatively, less complex exercises can be rotated more liberally for variety. • Attention must be given to applied anatomical and biomechanical considerations so that exercise selection is not simply a collection of diverse exercises, but rather a cohesive, integrated strategy designed to target the entire musculature.
SET END POINT	<ul style="list-style-type: none"> • Novice lifters can achieve robust gains in muscle mass without training at a close proximity to failure. As an individual gains training experience, the need to increase intensity of effort appears to become increasingly important. • Highly trained lifters may benefit from taking some sets to momentary muscular failure. In such cases, its use should be employed somewhat conservatively, perhaps limiting application to the last set of a given exercise. • Confining the use of failure training primarily to single-joint movements and machine-based exercises may help to manage the stimulus-fatigue ratio and thus reduce potential negative consequences on recuperation. • Older athletes should employ failure training more sparingly to allow for adequate recovery. • Periodizing failure training may be a viable option, whereby very high levels of effort are employed liberally prior to a peaking phase, and then followed by a tapering phase involving reduced levels of effort.

TABLE 1 | Model of exercise prescription with BFR-RE.

	Guidelines
Frequency	2–3 times a week (>3 weeks) or 1–2 times per day (1–3 weeks)
Load	20–40% 1RM
Restriction time	5–10 min per exercise (reperfusion between exercises)
Type	Small and large muscle groups (arms and legs/uni or bilateral)
Sets	2–4
Cuff	5 (small), 10 or 12 (medium), 17 or 18 cm (large)
Repetitions Pressure	(75 reps) – 30 × 15 × 15 × 15, or sets to failure 40–80% AOP
Rest between sets	30–60 s
Restriction form	Continuous or intermittent
Execution speed	1–2 s (concentric and eccentric)
Execution	Until concentric failure or when planned rep scheme is completed

Annexe 43 - Recommandations d'utilisation du BFR

Issues de Patterson et al. (2019)

Annexe 44 : Certification de participation à une conférence de Full Physio sur le RTR

ATTESTATION DE PARTICIPATION

À compléter par le participant



Je soussigné Alexandre Gérard, Co-fondateur de Fullphysio, atteste que :

Prénom et Nom : ... *Anthony CARRE*

a assisté au replay en date du 07/12/2023.

Ce webinaire a duré 1h30.

Fait à Paris (France), le 07/12/2023

Agérard

Rendez-vous sur fullphysio.com pour retrouver
plus de 2700 ressources et outils cliniques utiles en kinésithérapie

Annexe 44 - Certification de participation à une conférence de Full Physio sur le RTR

