

Évaluation du taux de développement de la force des extenseurs du genou entre six et neuf mois après ligamentoplastie du LCA selon la technique DIDT

Knee extensor rate of force development between six and nine months after anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring tendon grafts

(Abstract on page 173)

Bewertung der Kraftentwicklung der Kniestrecker zwischen sechs und neun Monaten postoperativ nach ACL-Bandplastiken mit Harmstring-Sehnen-Transplantat

(Zusammenfassung auf Seite 174)

Fabien Bonnefoy Cudraz¹ (PT), Pierre Samozino² (PhD)

Mains Libres 2023; 2: 167-175 | DOI: 10.55498/MAINSLIBRES.2023.11.3.167

MOTS-CLÉS retour au sport / quadriceps / taux de développement de la force / ligamentoplastie / ligament croisé antérieur / isocinétisme

RÉSUMÉ

Contexte: L'établissement des meilleurs critères de retour au sport (RAS) dans les suites d'une ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (LCA) ne fait toujours pas consensus. Notamment, le taux de développement de la force (TDF), indicateur de la capacité d'un muscle à produire de la force rapidement, n'est actuellement pas inclus systématiquement dans les batteries de test de RAS.

Objectif: L'objectif de cette étude était d'évaluer la récupération du TDF des extenseurs de genou entre 6 à 9 mois après la reconstruction du LCA, et de la comparer à la récupération du couple maximal des extenseurs de genou.

Méthode: 4 hommes et 5 femmes ont été évalués entre 6 et 9 mois après l'opération. Le taux de développement de la force des extenseurs du genou a été évalué de manière isométrique à 60° de flexion du genou (TDF₀₋₂₀₀), tandis que le couple maximal des extenseurs de genou a été mesuré de manière concentrique lors d'un test isocinétique à 60°/s.

Résultats: Une différence significative a été observée entre les valeurs TDF₀₋₂₀₀ du côté lésé et du côté non lésé, comme l'indique l'indice de symétrie du membre inférieur (ISMI = 72%). Aucune différence significative n'a été constatée entre la récupération du TDF et celle du couple maximal des extenseurs de genou (ISMI = 81%). Cependant, il n'y avait pas de corrélation entre ces deux valeurs.

Conclusion: Un déficit du TDF₀₋₂₀₀ des extenseurs du genou est encore présent entre 6 et 9 mois après ligamentoplastie du LCA avec greffon au tendon des ischio-jambiers. Le TDF des extenseurs du genou ne semble pas avoir récupéré de manière semblable au pic de couple des extenseurs du genou, ce qui supporterait l'intérêt d'inclure cet indicateur dans les batteries de tests de RAS.

¹ Centre de rééducation et de traumatologie Medi Berriat, Grenoble, France

² Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, Chambéry, France

CONTEXTE

Les lésions du ligament croisé antérieur (LCA) représentent un problème de santé publique important dans de nombreux pays. L'incidence de la lésion du LCA aux Etats-Unis est de 120 000 cas par an (soit 0,036% de la population⁽¹⁾); elle est de 35 000 cas en France (soit 0,05%⁽²⁾). Le coût annuel pour un pays comme les Etats-Unis serait de 1 milliards de dollars⁽¹⁾. Dans une population d'athlète, l'incidence peut monter jusqu'à 3,7%/an selon les études, particulièrement dans les sports à changement de direction⁽³⁾. Une partie importante des sportifs blessés doit subir une intervention chirurgicale pour restaurer un genou stable permettant de pouvoir reprendre les activités physiques. La rééducation se poursuit la plupart du temps jusqu'à 9 à 12 mois, pour ramener le patient à un niveau suffisant pour reprendre le sport, notamment en compétition⁽⁴⁾. Toutefois Ardern *et al.* (2016) montrent, dans leur revue de la littérature⁽⁵⁾, que parmi les patients opérés, seulement 65% reprennent leur sport au niveau d'avant la blessure. Wiggins *et al.* (2016)⁽⁶⁾ montrent même que les ruptures itératives sont fréquentes, jusqu'à 15% chez les sportifs.

La conférence de consensus de 2016 met en avant la complexité de la décision de reprise du sport après une blessure, qui doit inclure de nombreux critères de types biologique, physique, psychologique et sociale⁽⁷⁾. La connaissance des critères les plus pertinents a toute son importance, car ces derniers peuvent orienter la rééducation. En effet, en ciblant les qualités sur lesquelles les patients doivent progresser, les professionnels de la rééducation peuvent fixer des objectifs pertinents et mieux orienter leurs prises en charge. Il s'agira d'amener le sujet à un niveau de récupération suffisant pour qu'il soit dans des conditions optimales pour reprendre le sport en toute sécurité et ainsi limiter le risque de récurrence traumatique⁽⁸⁾. Quel que soit la qualité évaluée, le niveau de récupération est souvent appréhendé par la comparaison entre les côtés sain et opéré, au travers notamment de l'Indice de Symétrie des Membres Inférieurs (ISMI) ($\text{[valeur côté lésé] / [valeur côté sain]} \times 100$)⁽⁹⁾.

Parmi les capacités fonctionnelles des membres inférieurs souvent testées, la capacité de production de force (puissance ou couple maximaux, taux de développement de la force (TDF), endurance de force) sont des qualités importantes⁽⁷⁾ et particulièrement suite à une ligamentoplastie du LCA. De nombreux auteurs ont montré l'importance de la récupération d'un niveau de force des extenseurs du genou quasi symétrique au côté sain (ISMI > 90%)^(8,10,11). Les résultats de Grinderm *et al.* (2016)⁽¹¹⁾, précisent que 1% de récupération de symétrie de force des extenseurs du genou en plus (par rapport au côté lésé), diminue de 3% les risques de subir une nouvelle lésion. L'importance d'une récupération complète des capacités fonctionnelles des extenseurs du genou ne se limite pas seulement à la réussite de la reprise du sport. En effet, Van Wyngaarden *et al.* (2020) mettent en évidence le lien qui existe entre la récupération de la force des extenseurs du genou et la fonction auto-rapportée après plusieurs années⁽¹²⁾. Dans leurs méta-analyses, Oiestad *et al.* (2015, 2022)^(13,14) établissent un lien entre une faiblesse des extenseurs du genou et le développement de l'arthrose du genou.

Certains auteurs estiment que l'établissement de critères objectifs permettant de valider la reprise du sport après les

ligamentoplasties du LCA ne fait toujours pas consensus en 2022⁽¹⁵⁾. Par exemple, le travail de Blucher *et al.* (2022) montre qu'il n'y a pas d'association entre la récupération de la force maximale des extenseurs du genou et des ischio-jambiers et le risque de récurrence de lésion du LCA⁽¹⁶⁾. Ce constat encourage à explorer d'autres critères susceptibles d'être également pertinents pour caractériser la récupération fonctionnelle des membres inférieurs, notamment des extenseurs du genou. Au-delà du niveau maximal de force ou de puissance pouvant être développé, la rapidité avec laquelle cette force est développée est également très importante, que ce soit pour optimiser la performance⁽¹⁷⁾ ou réduire le risque de récurrence traumatique, comme le souligne Ardern *et al.* (2016)⁽⁷⁾

Le taux de développement de la force (TDF) est justement utilisé pour caractériser la capacité d'un muscle à produire de la force rapidement^(18,19), appelée communément force explosive. Il correspond à la dérivée de la courbe de la force en fonction du temps lors d'une contraction explosive maximale. Cette capacité des muscles à produire de la force rapidement est importante dans les sports qui demandent des actions dynamiques⁽²⁰⁾. En effet, de nombreuses actions sportives doivent se réaliser dans des temps les plus courts possible comme les changements de direction par exemple. Cette contrainte temporelle fait que le sportif ne peut pas exprimer son moment de force maximale. Dans ces conditions, le TDF devient un paramètre particulièrement intéressant à explorer⁽²¹⁾. Les mécanismes de lésions ligamentaires se déroulent également dans des temps très courts, de l'ordre de 200ms pour la lésion du LCA en ski⁽²²⁾. Il est donc nécessaire que les muscles puissent se contracter très rapidement à une intensité suffisante pour protéger les articulations. Des valeurs élevées de TDF semblent donc aussi primordiales pour assurer la protection des articulations. Le TDF peut se mesurer sur différents intervalles de temps, généralement compris entre 0 et 250ms^(18,19). On distingue souvent deux phases dans l'analyse du TDF. La phase précoce correspond à ce qui se déroule avant 100ms et est fortement influencée par les facteurs neuronaux de la contraction et la typologie musculaire. La phase tardive correspond à la période au-delà de 100ms. Elle est plutôt corrélée au moment de force maximale⁽¹⁹⁾ et donc à ses déterminants (par exemple les facteurs centraux neurologiques, l'aire de section transversale du muscle ou la rigidité du complexe musculo-tendineux)⁽¹⁸⁾.

Dans leur revue de littérature sur l'évaluation du TDF dans les suites de ligamentoplastie du LCA, Turpeinen *et al.* (2020)⁽²³⁾ concluent qu'il existe effectivement un déficit du TDF des extenseurs du genou après une ligamentoplastie du LCA. Ce déficit est compris selon les études, dans une fourchette allant de -7 à -55% par rapport au côté non lésé, pour des prises de mesures réalisées entre le 4^{ème} et le 49^{ème} mois en moyenne. De même, Maestroni *et al.* (2021) prennent en compte, dans leur méta-analyse, des études avec des délais différents (4 à 49 mois), sans individualiser le choix de greffons (ischio-jambiers ou tendon patellaire)⁽²⁴⁾. Cette grande variabilité de déficit du TDF rapportée précédemment peut donc s'expliquer par des évaluations à des délais différents, mais aussi par une variabilité inter-individuelle importante. Il semble donc intéressant de mieux connaître le niveau et la variabilité inter-individuelle du déficit du TDF des extenseurs du genou en post-ligamentoplastie du LCA pour un délai donné (entre 6 et 9 mois), ainsi que son potentiel lien avec le déficit du couple maximal de force du quadriceps.

En effet, peu d'informations sont disponibles sur l'association ou non de la récupération du TDF et de la force maximale du quadriceps post ligamentoplastie. Angelozzi *et al.* (2012) mettent en évidence un déficit du TDF, alors que la force maximale volontaire isométrique a été récupérée, mais sur une mesure en chaîne cinétique fermée (presse à quadriceps), qui ne mesure pas uniquement les extenseurs de genou⁽²⁵⁾. Knezevic *et al.* (2014) montrent une différence significative entre la récupération du TDF et celle de la force maximale du quadriceps à 6 mois post opératoire, chez des sujets ayant été opérés par une ligamentoplastie issue du tendon rotulien, sans pour autant donner d'information sur l'association entre la récupération de ces deux paramètres⁽²⁶⁾. Dans le cas d'un niveau important de déficit du TDF (jusqu'à 55%⁽²³⁾), d'une grande variabilité inter-individuelle et d'une absence de corrélation avec le déficit du couple maximal de force, le TDF serait alors un critère important à considérer dans le processus de retour au sport (RAS), car il apporterait des informations supplémentaires sur un paramètre fonctionnel non-récupéré entre 6 et 9 mois, et dont la récupération serait très individuelle. Il serait alors également intéressant d'orienter la rééducation vers des exercices visant à améliorer cette qualité spécifique^(20,39).

L'objectif principal de cette étude non randomisée consiste à quantifier le niveau de déficit du TDF des extenseurs du genou entre 6 et 9 mois post-opératoire après une ligamentoplastie du genou de type Droit Interne et Demi Tendineux (DIDT), en comparaison au côté non opéré. Etant donné que le type de greffon utilisé dans la ligamentoplastie du LCA peut induire des différences de récupération au niveau des extenseurs du genou⁽²⁴⁾, cette étude s'est intéressée à un seul type de greffon, celui prélevé au niveau des ischio-jambiers médiaux, DIDT. L'hypothèse posée était qu'un déficit est encore présent entre 6 et 9 mois, marqué par une différence entre le côté sain et le côté opéré et un ISMI inférieur au seuil usuellement toléré (90%), avec une variabilité inter-individuelle importante⁽²⁰⁾. L'objectif secondaire était de tester si l'évaluation du TDF des extenseurs du genou apportait des informations différentes par rapport à la force maximale dynamique évaluée via le pic de couple des extenseurs du genou à 60°/s (vitesse référence dans l'évaluation isocinétique de la force concentrique). Pour cela, d'une part le niveau de récupération (évalué par l'ISMI) du TDF des extenseurs du genou a été comparé au niveau de récupération du pic de couple concentrique des extenseurs du genou, d'autre part la corrélation entre pic de couple et TDF a été testée. Etant donné que le TDF et le pic de couple correspondent à des qualités différentes liées à des mécanismes neuromusculaires et physiologiques différents⁽²⁰⁾, l'hypothèse secondaire était qu'il existe des valeurs d'ISMI différentes entre TDF et pic de couple, sans corrélation entre elles.

MÉTHODE

Population

Des patients âgés de 18 à 60 ans, de sexe féminins et masculins ayant été opérés d'une ligamentoplastie selon la technique du DIDT, avec ou sans plastie antéro-latérale, ont été recrutés pour participer à cette étude. Leur chirurgien avait prescrit, de manière systématique, un bilan isocinétique et fonctionnel pour orienter la fin de la prise en charge avant la reprise du sport.

Les tests ont été réalisés entre le 6^{ème} et 9^{ème} mois post-opératoire. Tous les participants ont bénéficié d'une rééducation conduite par le kinésithérapeute de leur choix. Ils étaient informés au préalable et devaient signer une fiche de consentement éclairé en cas d'acceptation. Les critères d'exclusion étaient: la présence d'un flexum, un épanchement articulaire, une pathologie du membre inférieur controlatéral, l'impossibilité de réaliser correctement le test, la présence de douleur pendant la prise de mesure et le refus de signer la fiche de consentement éclairé. La collection des données s'est réalisée dans le cadre de la prise en charge habituelle des patients et respectait les principes éthiques de la déclaration d'Helsinki (1964) relative à la recherche scientifique sur les êtres humains et émise par l'Association Médicale Mondiale.

Protocole et mesures réalisées

Le patient était installé sur la machine isocinétique (Biodex System 3, Biodex Medical Systems, Inc, Shirley, NY, États-Unis) de manière méthodique: assis, flexion de hanche 85°, profondeur du siège réglée de manière à laisser deux travers de doigt au niveau du creux poplité, axe du dynamomètre aligné sur l'épicondyle latéral du fémur, une ceinture de maintien sur la cuisse, deux ceintures pour le tronc et une pour le bassin, ainsi que le contre-appui tibial positionné avec deux travers de doigt au-dessus de la malléole externe (Figure 1). L'angle de genou de 0° était positionné en prenant l'extension active maximale réalisée par le sujet. L'effet de la pesanteur sur le segment jambier était mesuré afin de corriger les mesures relevées.

Figure 1

Positionnement du patient sur le Biodex 3



Taux de développement de la force (TDF)

Le TDF des extenseurs du genou a été mesuré en condition isométrique, à 60° de flexion du genou⁽²⁷⁾, à l'aide de la machine isocinétique mesurant le couple de force au niveau du genou à 100Hz.

Dans un premier temps, le patient devait s'échauffer globalement 10 minutes sur un cycloergomètre, à 1 watt/kg de poids de corps.

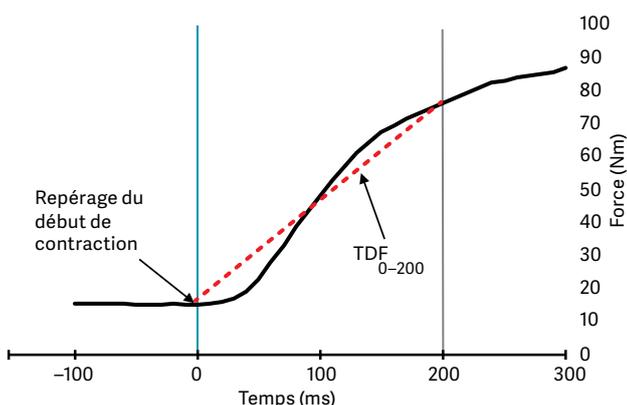
Le sujet était ensuite installé sur la machine isocinétique comme décrit ci-dessus. Il réalisait au moins 5 répétitions de contractions sous-maximales des extenseurs du genou afin de finir de s'échauffer et de se familiariser avec l'appareil et le protocole de test. Il devait suivre les directives tirées de l'étude de Maffiuletti *et al.* (2016)⁽¹⁸⁾:

- Une pré-contraction de 20 Nm environ était demandée afin de mettre en tension les sangles rigides du contre-appui tibial.
- Le sujet contrôlait cette contraction par un rétrocontrôle visuel au niveau de l'écran informatique (repère visuel de couleur placé).
- Une fois cette contraction stabilisée, le décompte suivant permettait au patient de se préparer: » 3-2-1-GO«.
- Au «GO», le patient devait pousser «le plus rapidement possible contre la machine puis maintenir cette contraction pendant 2 secondes».
- Le patient a été encouragé verbalement pendant les 2 à 3 secondes, afin qu'il donne le meilleur de lui-même.
- Pendant le test réel, le patient réalisait 5 répétitions, entrecoupées de 20 secondes de récupération.

Un repérage visuel permettait d'identifier le temps 0 du début de la contraction musculaire: instant où la force passe au-dessus du niveau développé lors de la pré-contraction⁽¹⁸⁾ sur les courbes de force en fonction du temps. Les valeurs de force des 200ms précédant ce 0 ne devaient pas varier de plus de 0,5Nm. Pour chacun des tests, le taux de développement de la force atteint entre 0 et 200ms a été calculé (TDF_{0-200} en Nm/Kg/s). La valeur retenue était le meilleur résultat parmi les 5 tests effectués, pour chaque côté (Figure 2).

Figure 2

Signal typique de force (ligne noire) lors d'une contraction maximale volontaire (CMV) et illustration de la mesure du TDF_{0-200}



TDF: taux de développement de la force.

Pic de couple maximum

Les mesures du pic de couple maximum à une vitesse constante de 60°/s ont été réalisées à la suite du protocole de mesure du TDF, après 5 minutes de pause. La même machine isocinétique a été utilisée en suivant les recommandations d'Edouard *et al.* (2016)⁽²⁸⁾. Concernant l'installation sur la machine, les amplitudes et la mesure de la pesanteur étaient exactement les mêmes que lors du test présenté précédemment.

- Le patient effectuait 2 séries d'échauffement de 5 répétitions pour se familiariser à la vitesse du test.
- Le départ de la contraction des extenseurs du genou se faisait à 100° de flexion et la mesure du couple de force entre 100° et 10° de flexion.
- Pendant le test, il a été demandé au patient de pousser le plus vite possible contre la machine jusqu'à la butée de fin d'amplitude.
- Le retour se faisait de la même manière.
- Le patient réalisait 5 répétitions.
- Le patient a été encouragé verbalement à donner le meilleur de lui-même pendant le test.
- Le test était validé si le coefficient de variation du Pic de couple était < 10%.

La valeur retenue était celle du pic de couple maximum (en Nm/Kg), réalisée lors des 5 répétitions.

L'ensemble des mesures a été réalisé par un seul et unique opérateur, expérimenté dans l'utilisation de la machine isocinétique. Le protocole débutait systématiquement par le côté non opéré.

Index de symétrie des membres inférieurs (ISMI)

L'ISMI des TDF_{0-200} a été calculé à l'aide du ratio [TDF côté lésé] / [TDF côté sain] x 100, tout comme l'ISMI des pics de couples, à l'aide du ratio [Pic de couple côté lésé] / [Pic de couple côté sain] x 100, les deux valeurs d'ISMI étant exprimées en pourcentage.

Analyse statistique

Le logiciel JASP (version 0.16.2.0) a été utilisé pour le traitement statistique des données. Les données ont été présentées par les valeurs moyennes et écart-types.

Préalablement à l'analyse comparative, le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la normalité des données. Ensuite, des tests T de Student pour échantillons appariés ont été utilisés pour comparer les valeurs de TDF et de pic de couple entre côtés sain et lésé, ainsi que les valeurs d'ISMI entre TDF et pic de couple. La variabilité interindividuelle des ISMI a été quantifiée par le coefficient de variation (écart-type/moyenne, exprimé en %). Le test de corrélation de Pearson a été utilisé pour tester le lien entre les ISMI du pic de couple et du TDF. Pour évaluer l'importance des corrélations, le coefficient de corrélation a été interprété comme corrélation parfaite ($r=1$), presque parfaite ($1 \geq r \geq 0,9$), très importante ($0,9 \geq r \geq 0,7$), importante ($0,7 \geq r \geq 0,5$), modérée ($0,5 \geq r \geq 0,3$), faible ($0,3 \geq r \geq 0,1$) et insignifiante ($0,1 \geq r$). Le seuil de significativité a été préalablement fixé pour une valeur de $\alpha = 0,05$ (soit une significativité si $p < 0,05$).

RÉSULTATS

Neuf patients ont été recrutés pendant l'étude: quatre hommes et cinq femmes. Ils étaient âgés de 37,33 ($\pm 14,41$) ans et avaient bénéficiés d'une ligamentoplastie du LCA selon la technique du DIDT (droit interne demi-tendineux) en moyenne 7,11 ($\pm 1,27$) mois avant la réalisation des tests.

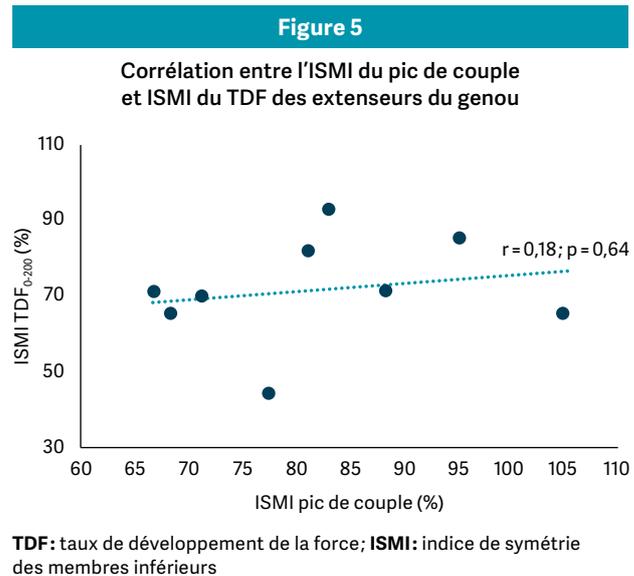
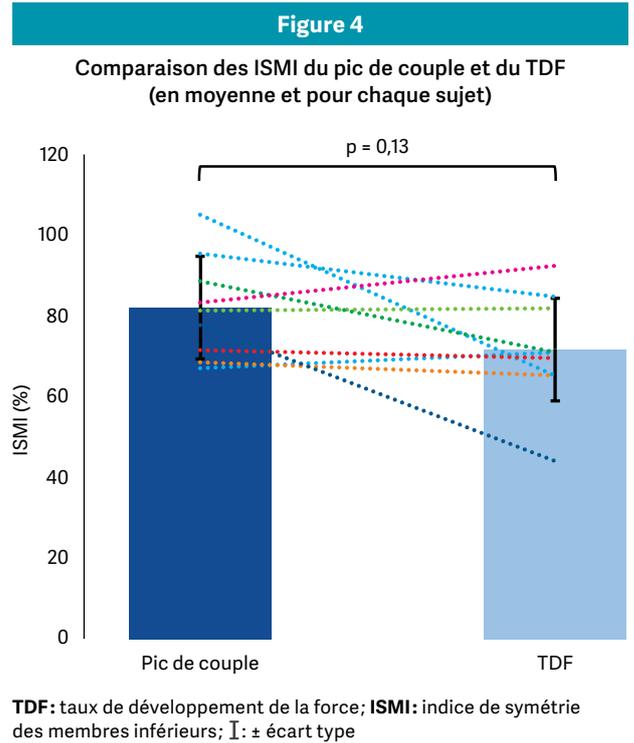
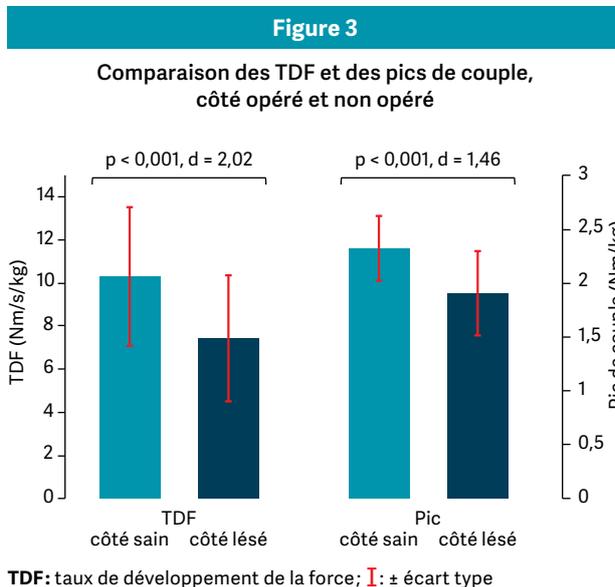
Les sujets faisaient en moyenne 1,71 ($\pm 0,10$) mètres (m), pour un poids de 68,78 ($\pm 14,44$) kilogrammes (kg). Leur indice de masse corporelle (IMC) moyen était de 23,53 ($\pm 2,58$) kg/m² (Tableau 1).

Tableau 1					
Caractéristiques morphologiques des participants					
	Âge (ans)	Taille (m)	Poids (kg)	IMC (kg/m ²)	J+ (mois)
Moyenne (\pm écart type)	37,3 ($\pm 14,4$)	1,71 ($\pm 0,10$)	68,8 ($\pm 14,4$)	23,53 ($\pm 2,58$)	7,11 ($\pm 1,27$)

Les valeurs du TDF₀₋₂₀₀ des extenseurs du genou sont significativement plus faibles ($p < 0,001$, $d = 2,21$) du côté opéré (7,43 $\pm 2,92$ Nm/s/kg) que du côté sain (10,30 $\pm 3,22$ Nm/s/kg). Le TDF₀₋₂₀₀ côté opéré est déficitaire de 28,3% (± 14) par rapport au TDF₀₋₂₀₀ côté sain.

Les valeurs des pics de couple des extenseurs du genou, mesurés à 60°/s en isocinétique sont significativement plus faibles ($p < 0,001$, $d = 1,38$) du côté opéré (1,90 $\pm 0,39$ Nm/kg) que du côté sain (2,32 $\pm 0,30$ Nm/kg). Le pic de couple des extenseurs du genou côté opéré est déficitaire en moyenne de 18% ($\pm 12,7\%$) par rapport au pic de couple côté sain (Figure 3).

Les valeurs des ISMI obtenus sont de 82% ($\pm 12,7\%$) pour les pics de couple des extenseurs du genou à 60°/s et de 71,7% ($\pm 14\%$) pour le TDF₀₋₂₀₀, sans différence significative entre les deux ($p = 0,11$) (Figure 4). Les variabilités interindividuelles des ISMI étaient respectivement de 15,5% et 19,5% pour le pic de couple et le TDF. Aucune corrélation entre les valeurs d'ISMI calculées sur le TDF et sur le pic de couple n'a été observée ($r = 0,18$, $p = 0,64$) (Figure 5).



DISCUSSION

Déficit du TDF

L'objectif de cette étude était de déterminer s'il existe un déficit de TDF des extenseurs du genou à 6-9 mois post-ligamentoplastie selon la technique du DIDT. Les résultats montrent qu'il existe clairement une différence de TDF₀₋₂₀₀ des extenseurs du genou entre le côté lésé et le côté sain entre 6 et 9 mois post ligamentoplastie du LCA selon la technique du DIDT. L'ISMI est de 72% (± 12), soit un déficit moyen de 28% par rapport au côté sain. Cette valeur confirme le déficit moyen de TDF₀₋₂₀₀ des extenseurs du genou présenté par Turpeinen *et al.* (2020) qui se situe entre -7 et -55%⁽²³⁾. Plus précisément, Larsen *et al.* (2015)

(88% de ligamentoplasties selon la technique du DIDT) présentent un déficit de 22% du TDF₀₋₂₀₀ à 11 mois post opératoire⁽²⁹⁾, ce qui paraît cohérent avec notre population de patients à ~7 mois post opératoire d'une ligamentoplastie selon la technique du DIDT.

Une valeur seuil à 90% de l'ISMI constitue généralement le critère de retour au sport⁽⁹⁾. La récupération de ce facteur, qui peut être important dans la prévention des blessures⁽²²⁾, dans les stratégies d'amortissement de l'impact^(30,31) et dans le retour à la performance, n'est donc généralement pas acquise à cette période post-opératoire. En effet, une variabilité interindividuelle importante d'ISMI est observée pour le TDF, avec un coefficient de variation de ~20% (en comparaison au 15% pour le pic de couple), des valeurs allant de 65% à 92% et un seul patient présentant une valeur d'ISMI supérieur à 90%. Cela va dans le sens de l'étude de Weiling *et al.* (2018)⁽³²⁾ qui montre que seuls 21% des patients ont un ISMI >90% sur l'ensemble des tests de force à 9 mois post-opératoires. En outre, cette étude met en évidence un déficit du TDF quadriceps dans les suites d'une ligamentoplastie exclusivement selon la technique du DIDT. Cela confirme les résultats de la récente étude de Suzuki *et al.* (2022), qui mettent en évidence un déficit significatif du TDF en phase tardive (de 100 à 200ms) chez des jeunes sportives opérées avec un greffon aux ischio-jambiers⁽³³⁾.

Comparaison ISMI pic de couple versus ISMI TDF

Contrairement aux hypothèses de départ, les résultats ne montrent pas de différence significative entre l'ISMI du TDF et celui du pic de couple maximum à 60°/s. Deux interprétations peuvent être formulées face à ce constat. D'une part, malgré une différence moyenne de 10 points entre les deux valeurs d'ISMI (ISMI pour le TDF 72%, ISMI pour le Pic de couple 82%, $p=0,126$), la différence n'est pas significative. Potentiellement ce résultat pourrait être en lien avec une trop faible puissance statistique (faible nombre de sujets), ne permettant pas de rejeter l'hypothèse nulle (absence de différence) alors qu'elle est fautive (erreur de type 2). Cependant, une analyse individuelle des résultats s'avère intéressante. En effet, un consensus professionnel établit un seuil de récupération de 90% pour valider le retour au sport⁽⁹⁾. Par conséquent, si les professionnels de santé s'intéressent uniquement au pic de couple, il se pourrait qu'ils autorisent des patients à reprendre leur sport alors que leur TDF des extenseurs du genou n'a pas atteint cette limite. C'est le cas de 3 des sujets, dont l'ISMI du pic de couple est supérieur à 90% (105%, 95,5% et 91%), mais dont l'ISMI du TDF₀₋₂₀₀ est bien plus faible (respectivement 65%, 85%, 72%). D'autant plus lorsque l'on sait que l'utilisation d'un simple ISMI post-opératoire peut sous-estimer les déficits par rapport au niveau préopératoire du côté non lésé⁽³⁴⁾.

D'autre part, ce manque de différence pourrait s'expliquer par l'influence importante de la force maximale sur la phase tardive du TDF⁽¹⁹⁾. Il semblerait que la phase précoce du TDF (de 0 à 100ms) soit plus influencée par l'activation neurale⁽³⁵⁾ et que la phase tardive (> 100ms) soit plus dépendante de la force maximale et d'aspects structuraux du muscle. Andersen *et al.*⁽³⁶⁾ estiment même de 52 à 81% le poids de la force maximale sur la variance du TDF tardif (> 90ms). Le choix d'un TDF englobant la phase précoce et la phase tardive (0-200ms) minimise probablement l'impact de

la récupération des aspects neurologiques de la contraction musculaire. Cependant, Turpeinen *et al.* (2020) émettent un doute sur la question des facteurs influençant le TDF précoce et le TDF tardif chez des populations blessées⁽²³⁾. En effet, les études qui se sont intéressées à la question ont été réalisées exclusivement chez des individus en bonne santé. On ne sait pas si des relations similaires existent dans d'autres populations, au sein desquelles l'activation neuronale est ralentie au début de la contraction et dont l'influence pourrait encore être importante pour la phase tardive du TDF.

Par ailleurs, les résultats de cette étude montrent au final qu'il n'existe pas de corrélation entre l'ISMI du TDF₀₋₂₀₀ des extenseurs du genou et celui du pic de couple maximum à 60°/s. Cela confirme que, au-delà de leur variabilité interindividuelle importante entre 6 et 9 mois post ligamentoplastie, ces deux valeurs ne sont pas corrélées, et donc ne rendent pas compte des mêmes informations sur la récupération fonctionnelle des capacités de production de force du quadriceps. Deux patients qui ont la même récupération du pic de couple peuvent présenter des récupérations du TDF allant du simple au double, et vice versa (Figure 5). Il existe donc un intérêt à évaluer indépendamment le TDF des extenseurs du genou et à l'inclure dans les batteries de test pré-RAS comme critère supplémentaire de décision.

Limites méthodologiques.

Tout d'abord, le logiciel utilisé, fourni pour l'utilisation de la machine isocinétique Biodex 3, permettait un échantillonnage de 100 Hz uniquement. Maffiuletti *et al.* (2018)⁽¹⁸⁾ recommandent un outil permettant de récupérer des données avec une fréquence de 1000 Hertz, notamment afin d'améliorer la détection du début de la contraction musculaire. Dans le même objectif de précision, il apparaît également plus fiable d'utiliser des dynamomètres fabriqués sur mesure, qui possèdent souvent un niveau de bruit inférieur aux dynamomètres isocinétiques classiques⁽¹⁸⁾. Par ailleurs, les ergomètres isocinétiques utilisés en clinique ne sont pas conçus spécifiquement pour l'évaluation du TDF, notamment du fait des différents éléments compliants composant le siège en vue du confort du patient, mais altérant la vitesse de transmission de force et affectant les valeurs du TDF. Néanmoins, cet outil de mesure est régulièrement utilisé en clinique dans le cadre des suivis pour le RAS, notamment pour mesurer le pic de couple des extenseurs et des fléchisseurs de genou. Il était donc important d'utiliser une machine isocinétique pour tester la pertinence du TDF, pour qu'il puisse facilement intégrer les batteries de test déjà existantes.

Dans ce travail le patient devait mettre en pré-tension une sangle, ce qui activait déjà un peu les unités motrices. Cette pré-activation peut entraîner une modification de la courbe force/temps dans les 40 premières millisecondes ayant comme conséquence de diminuer le pic de TDF⁽¹⁸⁾. Pour limiter les erreurs, la pré-contraction a été standardisée autour de 20Nm. Pour être encore plus précis, il aurait fallu personnaliser cette pré-contraction à un pourcentage de la force maximale volontaire isométrique mesurée préalablement⁽¹⁹⁾.

La population de cette étude était limitée en nombre et plutôt hétérogène en termes d'âge (de 15 à 60 ans) et de genre (4 hommes et 5 femmes). Par exemple, il serait probablement intéressant de différencier les résultats selon les

genres puisque comme le montre Kuenze *et al.* (2019)⁽³⁷⁾, il existe des différences de récupération de la force maximale et du TDF entre les sujets masculins et féminins même à 12 mois post-opératoires. Il aurait également été opportun de quantifier l'activité physique habituelle des patients au moyen par exemple de l'Echelle d'activité de Tegner, comme recommandé par Turpeinen⁽²³⁾. L'absence de groupe contrôle (apparié en fonction de l'âge, du sport, du genre...) peut également être considérée comme une limite. Un groupe contrôle aurait permis de vérifier que la récupération de la force et du TDF n'était pas sous-estimée. En effet, plusieurs auteurs ont démontré que les déficits étaient sous-évalués à 6 mois post-opératoires du fait de la récupération incomplète du côté sain^(34,38).

Enfin, il faut ajouter que la rééducation qui a été suivie pendant les 6 mois post-opératoires n'a pas été contrôlée, que ce soit en termes de contenu, ou en termes de fréquence et de volume. Ceci pourrait avoir grandement son importance puisque comme le montre plusieurs auteurs^(20,39), un entraînement spécifique bien conduit permet d'améliorer spécifiquement le TDF. Néanmoins, ce point renforcerait l'intérêt d'inclure le TDF dans les critères de RAS étant donné que la nature de la prise en charge pourrait influencer le niveau de récupération du TDF, indépendamment du pic de couple.

Perspectives

Des études longitudinales sont nécessaires afin d'objectiver si une corrélation existe entre le niveau de récupération du TDF et la réussite du retour au sport ou la rupture itérative. Des résultats positifs pourraient définitivement démontrer l'intérêt de ce critère parmi les tests pré-RAS. A moyen terme, il serait aussi intéressant d'observer si dans les mois suivants (> 9 mois), les patients récupèrent un niveau suffisant de TDF, c'est-à-dire avec un ISMI > 90%.

Il serait important aussi de clarifier quel type de rééducation permet d'optimiser la récupération de cette qualité spécifique des extenseurs du genou. En effet, même si Aagaard *et al.* (2002) et de Oliveira *et al.* (2013) nous ont présenté certains exercices permettant d'améliorer le TDF, les populations étaient des sujets sains^(20,39). Enfin, cette étude pourrait aussi être enrichie en analysant plus précisément les différentes phases du TDF (précoce < 100ms, tardif > 100ms, TDF max).

Implication clinique

Le TDF des extenseurs du genou étant déficitaire entre le 6^e et le 9^e mois post-opératoires, et non corrélé au déficit du pic de couple des extenseurs du genou, il paraît intéressant de l'inclure dans les critères de décisions pour le retour au sport.

Il semble important de pouvoir orienter la rééducation vers des exercices et des stratégies qui visent à améliorer ce critère. Le programme de renforcement progressif proposé par Rodríguez-Rosell *et al.* (2018)⁽¹⁹⁾ sur 14 semaines, utilisant des charges élevées allant de la 10 RM à 3 RM, permet des gains significatifs de TDF et de la force maximale isométrique. De la même manière, Andersen *et al.* (2010), toujours sur 14 semaines et 35 séances environ, en utilisant des charges de 12 à 6 RM, obtiennent des gains de force maximale et de TDF observés lors de la phase tardive principalement⁽⁴⁰⁾.

CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer qu'il existe un déficit significatif du TDF des extenseurs du genou entre le 6^e et le 9^e mois post-opératoires d'une ligamentoplastie du LCA selon la technique du DIDT, associé à une grande variabilité inter-individuelle et décorrélée du déficit pouvant être observé sur le pic de couple. Ce travail vient compléter l'objectivation d'une récupération incomplète des extenseurs du genou, présente également au niveau du pic de couple en concentrique à 60°/s, bien que ces deux mesures semblent apporter des informations bien distinctes. L'évaluation du TDF pourrait être pertinente dans les batteries de tests validant le retour au sport. D'autres études sont nécessaires pour améliorer la connaissance de ces critères indispensables dans l'évaluation qui doit précéder le retour aux activités sportives.

IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE

- Dans les suites d'une ligamentoplastie du LCA selon la technique du DIDT, le TDF des extenseurs du genou est un critère qui pourrait être pris en compte dans l'évaluation des patients avant leur retour au sport.
- Le contenu des programmes de rééducation dans les suites d'une ligamentoplastie au LCA aurait un intérêt à inclure des exercices et stratégies qui permettent la récupération du TDF des extenseurs du genou.

Contact

Fabien Bonnefoy-Cudraz
fabien.bonnefoy38@gmail.com

ABSTRACT

Background: Currently, there is no consensus on the optimal criteria for determining when athletes can safely return to sport (RTS) following anterior cruciate ligament (ACL) ligamentoplasty. The rate of force development (RFD) is an important indicator of a muscle's ability to produce force quickly. Further research is needed on this topic to determine whether RFD measurements can be included in a pre-RTS test battery.

Objective: The aim of this study was to assess the recovery of knee extensor RFD at six to nine months after ACL reconstruction and compare this with the recovery of knee extensor peak torque.

Method: Four men and five women were evaluated between six and nine months after surgery. Knee extensor RFD was assessed isometrically at 60° of knee flexion (RFD₀₋₂₀₀), while knee extensor peak torque was measured concentrically during isokinetic testing at 60° per second.

Results: A significant difference was observed between the RFD₀₋₂₀₀ values on the injured and uninjured sides, as indicated by the Limb Symmetry Index (LSI = 72%). No significant difference was found between the recovery of knee extensor RFD and knee extensor peak torque (LSI = 81%). However, there was no correlation between these two values.

Conclusion: A deficit in knee extensor RFD₀₋₂₀₀ is still present between six and nine months after ACL reconstruction with a hamstring tendon graft. The knee extensor RFD appears not to be recovered in a similar manner to the peak torque, which would support the interest in including this indicator in the pre-RTS test battery.

KEYWORDS

return to sport / quadriceps / rate of force development / ligamentoplasty / anterior cruciate ligament / isokinetics

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund: Bei der Festlegung der besten Kriterien für die Rückkehr zum Sport (RTS) nach einer ACL-Bandplastik gibt es immer noch keinen Konsens. Insbesondere die Kraftentwicklungsrates (TDF), ein Indikator für die Fähigkeit eines Muskels, schnell Kraft zu produzieren, ist derzeit nicht Teil der Pre-RTS-Testbatterien.

Ziel: Ziel dieser Studie war es, die Erholung der Kraftentwicklungsrates (TDF) des Quadrizeps sechs bis neun Monate nach der ACL-Rekonstruktion zu bewerten und mit der Erholung des Quadrizeps-Spitzen Drehmoments zu vergleichen.

Methode: Vier Männer und fünf Frauen wurden zwischen sechs und neun Monate nach der Operation beurteilt. Die TDF der Kniestrecker wurde isometrisch bei 60° Kniebeugung (TDF₀₋₂₀₀) gemessen, wohingegen das Spitzendrehmoment der Kniestrecker konzentrisch während isokinetischer Tests bei 60°/s gemessen wurde.

Ergebnisse: Es wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den TDF₀₋₂₀₀-Werten auf der verletzten und der unverletzten Seite festgestellt, wie sich anhand des Symmetrieindex der Gliedmaßen (ISMI = 72%) zeigt. Es wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der Erholung des TDF und des maximalen Kniestreckmoments festgestellt (ISMI = 81%). Außerdem gab es keine Korrelation zwischen diesen beiden Werten.

Schlussfolgerung: Auch sechs bis neun Monate nach der ACL-Rekonstruktion mit Hamstring-Sehnen-Transplantat ist ein Defizit des TDF₀₋₂₀₀ der Kniestrecker vorhanden. Die TDF der Kniestrecker scheint nicht in ähnlicher Weise wie das Spitzenmoment der Kniestrecker wiederhergestellt zu werden, was den Wert der Aufnahme dieses Indikators in die Pre-RTS-Testbatterien unterstützen würde.

SCHLÜSSELWÖRTER

Rückkehr zum Sport / Quadrizeps / Rate der Kraftentwicklung / Kreuzbandrekonstruktion / isokinetisch

Références

1. Kaeding CC, Léger-St-Jean B, Magnussen RA. Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clinics in Sports Medicine*. 2017;36(1):18.
2. Colombet P, Neyret P, Trojani C, Sbihi A, Djian P, Potel JF, et al. Traitement arthroscopique des échecs des reconstructions du ligament croisé antérieur. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Appareil Moteur*. 2007;93(8):5467.
3. Moses B, Orchard J, Orchard J. Systematic Review: Annual Incidence of ACL Injury and Surgery in Various Populations. *Research in Sports Medicine*. 2012;20(34):15779.
4. van Melick N, van Cingel REH, Brooijmans F, Neeter C, van Tienen T, Hullegie W, et al. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med*. 2016;50(24):150615
5. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sports Med*. 2014;48(21):154352.
6. Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD. Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med*. 2016;44(7):186176.
7. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, Witvrouw E, Clarsen B, Cools A, et al. Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med*. 2016;50(14):85364.
8. Buckthorpe M. Optimising the Late-Stage Rehabilitation and Return-to-Sport Training and Testing Process After ACL Reconstruction. *Sports Med*. 2019;49(7):104358.
9. Lynch AD, Logerstedt DS, Grindem H, Eitzen I, Hicks GE, Axe MJ, et al. Consensus criteria for defining 'successful outcome' after ACL injury and reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort investigation. *Br J Sports Med*. 2015;49(5):33542.
10. Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, Seil R, Padua D. Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017;25(1):1929.
11. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med*. 2016;50(13):8048.
12. Van Wyngaarden JJ, Jacobs C, Thompson K, Eads M, Johnson D, Ireland ML, et al. Quadriceps Strength and Kinesiophobia Predict Long-Term Function After ACL Reconstruction: A Cross-Sectional Pilot Study. *Sports Health*. 17 2020;13(3):2517.
13. Øiestad BE, Juhl CB, Eitzen I, Thorlund JB. Knee extensor muscle weakness is a risk factor for development of knee osteoarthritis. A systematic review and meta-analysis. *Osteoarthritis and Cartilage*. 2015;23(2):1717.
14. Øiestad BE, Juhl CB, Culvenor AG, Berg B, Thorlund JB. Knee extensor muscle weakness is a risk factor for the development of knee osteoarthritis: an updated systematic review and meta-analysis including 46 819 men and women. *Br J Sports Med*. 2022;56(6):349-355
15. Gokeler A, Dingenen B, Hewett TE. Rehabilitation and Return to Sport Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Where Are We in 2022? *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*. 2022;4(1):7782.
16. Blucher NC, Feller JA, Devitt BM, Klemm HJ, Whitehead TS, McClelland JA, et al. Is There an Association in Young Patients Between Quadriceps or Hamstring Strength After ACL Reconstruction and Graft Rupture? *Orthop J Sports Med*. 3 2022;10(6):23259671221101004.
17. Tillin NA, Pain MT, Folland J. Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players. *J Sports Sci*. 2013;31(1):66-76.
18. Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J. Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(6):1091116

- 19.** Rodríguez-Rosell D, Pareja-Blanco F, Aagaard P, González-Badillo JJ. Physiological and methodological aspects of rate of force development assessment in human skeletal muscle. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2018;38(5):74362.
- 20.** Folland JP, Buckthorpe MW, Hannah R. Human capacity for explosive force production: Neural and contractile determinants: Determinants of explosive force production. *Scand J Med Sci Sports*. déc 2014;24(6):894906.
- 21.** Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of Applied Physiology*. 2002;93(4):131826.
- 22.** Bere T, Flørenes TW, Krosshaug T, Koga H, Nordsletten L, Irving C, et al. Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury in World Cup Alpine Skiing: A Systematic Video Analysis of 20 Cases. *Am J Sports Med*. 2011;39(7):14219.
- 23.** Turpeinen J, Freitas TT, Rubio-Arias JA, Jordan MJ, Aagaard P. Contractile rate of force development after anterior cruciate ligament reconstruction—a comprehensive review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 2020;30(9):157285.
- 24.** Maestroni L, Read P, Turner A, Korakakis V, Papadopoulos K. Strength, rate of force development, power and reactive strength in adult male athletic populations post anterior cruciate ligament reconstruction – A systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy in Sport*. 2021;47:91104
- 25.** Angelozzi M, Madama M, Corsica C, Calvisi V, Properzi G, McCaw ST, et al. Rate of Force Development as an Adjunctive Outcome Measure for Return-to-Sport Decisions After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther*. sept 2012;42(9):77280.
- 26.** Knezevic OM, Mirkov DM, Kadija M, Nedeljkovic A, Jaric S. Asymmetries in explosive strength following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee*. déc 2014;21(6):103945.
- 27.** Thorstensson A, Grimby G, Karlsson J. Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol*. 1976;40:12–16.2
- 28.** Edouard P, Degache F. Guide d'isocinétisme: l'évaluation isocinétique des concepts aux conditions sportives et pathologiques, Paris: Elsevier-Masson, 2016
- 29.** Larsen JB, Farup J, Lind M, Dalgas U. Muscle strength and functional performance is markedly impaired at the recommended time point for sport return after anterior cruciate ligament reconstruction in recreational athletes. *Human Movement Science*. 2015;39:73-87.
- 30.** Maestroni L, Papadopoulos K, Turner A, Korakakis V, Read P. Relationships between physical capacities and biomechanical variables during movement tasks in athletic populations following anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport*. 2021;48:20918.
- 31.** Huang YL, Mulligan CMS, Johnson ST, Pollard C, Hannigan K, Stutzenberger L, et al. Explosive Quadriceps Strength Symmetry and Landing Mechanics Limb Symmetry After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Females. *Journal of Athletic Training*. 2021;56(8):91221.
- 32.** Welling W, Benjaminse A, Seil R, Lemmink K, Zaffagnini S, Gokeler A. Low rates of patients meeting return to sport criteria 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective longitudinal study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2018;26(12):363644.
- 33.** Suzuki M, Ishida T, Samukawa M, Matsumoto H, Ito Y, Aoki Y, et al. Rate of Torque Development in the Quadriceps after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with Hamstring Tendon Autografts in Young Female Athletes. *IJERPH*. 2022;19(18):11761.
- 34.** Wellsandt E, Failla M, Snyder-Mackler L. Limb Symmetry Indexes Can Overestimate Knee Function After ACL Injury. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2017;47(5):3348.
- 35.** Gruber M, Gollhofer A. Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *European Journal of Applied Physiology*. 2004;92(12):98105.
- 36.** Andersen LL, Aagaard P. Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur J Appl Physiol*. 2006;96(1):4652.
- 37.** Kuenze C, Lisee C, Birchmeier T, Triplett A, Wilcox L, Schorfhaar A, et al. Sex differences in quadriceps rate of torque development within 1 year of ACL reconstruction. *Physical Therapy in Sport*. 2019;38:3643
- 38.** Patterson BE, Crossley KM, Perraton LG, Kumar AS, King MG, Heerey JJ, et al. Limb symmetry index on a functional test battery improves between one and five years after anterior cruciate ligament reconstruction, primarily due to worsening contralateral limb function. *Physical Therapy in Sport*. 2020;44:6774.
- 39.** de Oliveira FBD, Rizzato GF, Denadai BS. Are early and late rate of force development differently influenced by fast-velocity resistance training? *Clin Physiol Funct Imaging*. 2013;33(4):2827.
- 40.** Andersen LL, Andersen JL, Zebis MK, Aagaard P. Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2010;20(1):e1629.