



La ballonisation des tunnels après reconstruction du ligament croisé antérieur

Tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction surgery

Mohamed Samih Kacem, Ala Aloui, Zied Jlalja, Sami Bahroun, Ali Jhimi, Mohamed Samir Daghfous

Institut Mohamed Taieb Kassab d'orthopédie, Tunis, Tunisie

RÉSUMÉ

Introduction: Le phénomène de ballonisation après la ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (LCA) a été fréquemment rapporté depuis les années quatre-vingt-dix. Ses étiologies sont encore floues.

Objectifs: Elucider les facteurs favorisant ce phénomène de ballonisation et étudier ses conséquences cliniques et anatomiques.

Méthodes: Il s'agissait d'une étude rétrospective descriptive menée sur 37 patients opérés au service de traumatologie à l'Institut Kassab d'orthopédie colligés entre janvier 2014 et septembre 2016 ayant subi une ligamentoplastie du LCA par les tendons des ischio-jambiers en mono faisceau avec fixation par des vis d'interférences résorbables. La ballonisation, le footprint et l'orientation des tunnels étaient étudiés sur des radiographies standards du genou. Au recul, les patients ont été évalués à l'aide de scores fonctionnels (Lysholm, Tegner et IKDC), d'un examen clinique et de radiographies de Télés.

Résultats: La ballonisation globale moyenne était de 51,7 % au niveau fémoral et de 48,88 % au niveau tibial. Les valeurs de la ballonisation fémorale étaient supérieures à celles de la ballonisation tibiale à tous les niveaux de mesure. Les facteurs qui semblaient favoriser la ballonisation étaient : l'âge avancé, le genre masculin, le retard de la chirurgie, les protocoles de rééducation accélérés, le placement non conforme des empreintes du transplant, et l'horizontalisation des tunnels. La ballonisation n'avait pas d'influence sur les scores fonctionnels (Lysholm, Tegner et score IKDC), mais d'après l'étude de la différentielle sur les radiographies télés, les ballonnisations fémorale et tibiale du groupe des genoux laxés (38% des cas) étaient supérieures à celles du groupe des genoux stables (62%). Toutefois, nos résultats étaient statistiquement non significatifs avec respectivement $p=0,584$ et $p=0,53$.

Conclusion: Plusieurs facteurs modifiables tel que le retard de chirurgie, les protocoles de rééducation accélérés, le placement non conforme des footprints et l'horizontalisation des tunnels semblaient influencer le phénomène de ballonisation. Cependant, des études prospectives avec un échantillon plus important seraient nécessaires pour les confirmer.

Mots clés: Reconstruction, LCA, Ballonisation, Facteurs, Prévention.

ABSTRACT

Introduction: Tunnel enlargement following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction has been frequently reported since the nineties, yet its etiologies remain unclear.

Aim: To elucidate the factors favoring this phenomenon and to investigate its clinical and anatomical consequences.

Methods: This was a descriptive retrospective study conducted on 37 patients who underwent ACL reconstruction surgery using single-bundle hamstring tendons with fixation using absorbable interference screws at the Traumatology Department of the Kassab National Institute of Orthopedics. The patients were collected between January 2014 and September 2016. Tunnel enlargement, footprint, and tunnel orientation were assessed using standard knee radiographs. At follow-up, patients were evaluated using functional scores (Lysholm, Tegner, and IKDC), clinical examination, and Telos radiographs.

Results: The average global Tunnel enlargement was 51.7% in the femur and 48.88% in the tibia. Femoral tunnel enlargement values were higher than tibial tunnel enlargement at all measurement levels, and it appeared to be a time-evolving phenomenon. Factors favoring tunnel enlargement seemed to include advanced age, male gender, delayed surgery, accelerated rehabilitation protocols, non-compliant placement of transplant footprints, and tunnel horizontalization. Tunnel enlargement did not influence functional scores (Lysholm, Tegner, and IKDC). However, based on the differential study of Telos radiographs, femoral and tibial tunnel enlargement in the lax knees group (38% of cases) was higher than in the stable knees group (62%). Nonetheless, our results were statistically non-significant with respective p-values of 0.584 and 0.53.

Conclusion: Several modifiable factors such as delayed surgery, accelerated rehabilitation protocols, incorrect footprint placement, and tunnel orientation appeared to influence the tunnel enlargement phenomenon. However, prospective studies with a larger sample would be necessary to confirm these findings.

Key words: Reconstruction, ACL, Tunnel, Enlargement, Factors, Prevention.

Correspondance

Mohamed Samih Kacem

Institut Mohamed Taieb Kassab d'orthopédie, Tunis, Tunisie

Email: kacemmsamih@gmail.com

INTRODUCTION

Le phénomène de ballonisation des tunnels après ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (LCA) a été décrit pour la première fois dans le début des années quatre-vingt-dix (1), et depuis, il a été fréquemment rapporté avec une incidence qui peut atteindre 70% (2).

Jusqu'à présent, les étiologies de ce phénomène sont encore peu claires, mais la plupart des auteurs optent pour un processus multifactoriel impliquant des facteurs mécaniques et biologiques.

Son impact sur les résultats cliniques bien qu'il soit encore controversé sur le plan fonctionnel, il est admis qu'il pourrait poser un problème en cas de révision.

Les objectifs de notre étude étaient d'évaluer la relation entre le positionnement des tunnels et le phénomène de ballonisation après la reconstruction du LCA mono-faisceau et d'élucider les autres facteurs mécaniques et biologiques favorisant ce phénomène.

MÉTHODES

Il s'agissait d'une étude monocentrique rétrospective et descriptive menée sur une période de 33 mois, allant de Janvier 2014 jusqu'à Septembre 2016.

Il était inclus tout patient présentant une rupture unilatérale isolée du LCA ou associée à des lésions méniscales, ayant subi une ligamentoplastie mono faisceau par les tendons des ischio-jambiers (DIDT) fixée par une vis d'interférence aussi bien au niveau fémoral que tibial avec un recul minimal d'un an. Nous avons exclu tous les patients ayant une atteinte multi ligamentaire du genou et toutes les reprises de ligamentoplastie ainsi que les patients ayant un greffon autre que le DIDT ou une fixation autre que la vis d'interférence.

Il était recueilli chez tous nos patients : l'âge, le genre, l'indice de masse corporelle (IMC), le niveau de l'activité sportive selon Tegner, le bilan lésionnel du genou, le délai de la chirurgie, le délai de rééducation ainsi que le protocole de suivi, le délai de reprise de l'activité sportive, le recul, la mobilité, le test de Lachman, le test de ressaut, le score de Lysholm, et le score IKDC.

Le positionnement des tunnels était étudié sur des radiographies standards du genou de face et de profil. Pour pouvoir l'évaluer dans l'espace, deux paramètres étaient utilisés : le footprint et l'angle d'orientation du tunnel dans les deux plans frontal et sagittal.

La position du footprint fémoral a été étudiée sur des radiographies standards de profil selon la méthode de Bernard et al (3) (Figure.1). La position est ainsi déterminée par deux variables : la profondeur et la hauteur. Pour déterminer la position du tunnel tibial nous avons utilisé la méthode de Amis et al (4) (Figure.1).



Figure 1. Footprint fémoral et tibial $P=a/b \times 100$, $H=c/d \times 100$, $T=e/f \times 100$

Sur la radiographie du genou de face, l'angle du tunnel fémoral frontal qui correspond à l'angle compris entre l'axe de la diaphyse fémorale et l'axe du tunnel fémoral frontal était calculé (Figure.2).

Sur la radiographie du genou de profil nous avons calculé l'angle du tunnel fémoral sagittal qui correspond à l'angle compris entre l'axe de la diaphyse fémorale et l'axe du tunnel fémoral sagittal (Figure.2).

Sur la radiographie de face et de profil l'angle du tunnel tibial correspondait à l'angle compris entre l'axe du tunnel et la tangente au plateau tibial médial (Figure.2).



Figure 2. Orientation des tunnels

AFF : Angle fémoral frontal, AFS : Angle fémoral sagittal, ATF : Angle tibial frontal, ATS : Angle tibial sagittal

L'angle de divergence tunnel-vis qui correspond à l'angle que fait l'axe de la vis avec l'axe du tunnel était mesuré sur les radiographies de face.

La ballonisation a été déterminée par le pourcentage de la variation de la largeur du tunnel par rapport à la largeur du tunnel initial postopératoire.

L'évaluation a été faite au dernier recul selon : Des scores fonctionnels : score de Lysholm, score de Tegner et le score IKDC, un examen clinique et des radiographies dynamiques de Télés KT1000 pour évaluer la laxité au recul.

Concernant l'analyse statistique les données étaient saisies et traitées sur le logiciel SPSS 22.0. Les données ont été étudiées selon deux mesures de deux observateurs différents pour tester la notoriété des résultats. Une relation fiable entre les deux mesures était démontré par le calcul du alpha Cronbach. Les comparaisons de deux moyennes étaient effectuées au moyen du test T de Student. L'étude de corrélation de la ballonisation des tunnels avec des variables quantitatives était calculée selon le coefficient de corrélation de Pearson. Le traitement de la relation de la ballonisation avec les variables qualitatives était faite à partir de la statistique de Chi². Dans tous les tests statistiques, le seuil de significativité retenu était de 0,05 ($p=0,05$).

RÉSULTATS

La population étudiée était majoritairement masculine (95% des patients) avec un sexe-ratio de 17,5. L'âge moyen était de 30,57 ans avec des extrêmes de 19 à 51 ans. L'indice de masse corporelle moyen était de 24,45 kg/m². Les ruptures isolées du LCA représentaient 27% des cas, tandis que 73% étaient associées à des lésions méniscales dont 45% était des lésions longitudinales, 36% des clivages horizontaux et 19% des lésions complexes. La suture méniscale était faite dans 40% des cas et 60%

étaient traitées par ménissectomie.

Le délai moyen de la chirurgie était de 21,84 mois. Tous nos patients ont été traités avec la technique des tunnels indépendants. Le recul moyen était de 20,29 mois. Le délai moyen du début de la rééducation était de 10,3 jours. L'appui a été autorisé après un délai moyen de 24,59 jours avec des extrêmes entre 7 et 60 jours. Le délai moyen de reprise de l'activité sportive était de 7,96 mois avec des extrêmes de 6 à 12 mois.

Concernant l'étude radiologique, Le footprint fémoral avait une profondeur moyenne de 31,83% dont 13 tunnels était postérieurs (P < 25 %), 10 étaient anatomiques (P entre 25 et 35 %) et 12 étaient antérieurs (P > 35 %). La hauteur (H) moyenne du footprint fémoral était de 12,03%. Quarante-et-un pour cent des tunnels étaient haut situés (H < 30 %) alors que 3 (9 %) étaient anatomiques (H entre 30 et 45%). Aucun tunnel bas situé n'était mentionné dans notre étude. Le footprint tibial (FT) moyen était situé à 49,9 % par rapport à la longueur antéro-postérieure totale du plateau tibial. Il était postérieur dans 90,8% des cas (FT > 40) et seulement trois tunnels (9,2 %) étaient placés dans une position anatomique (30 ≤ FT ≤ 40). Aucun tunnel n'était antérieur.

L'étude de la ballonisation des tunnels a montré que la ballonisation globale moyenne était de 51,7 % au niveau fémoral et de 48,88 % au niveau tibial. Les valeurs de la ballonisation fémorale étaient supérieures à celles de la ballonisation tibiale à tous les niveaux de mesure.

Lors de l'étude analytique, différents paramètres étaient examinés. La corrélation entre la ballonisation des tunnels et des variables démographiques telles que l'âge, le genre et l'IMC des patients était explorée. Cependant, aucune de ces variables n'a présenté de corrélation statistiquement significative (Tableau.1).

Tableau 1. Étude de la corrélation de la ballonisation des tunnels avec les paramètres démographiques.

	La valeur de P	
	Tunnel fémoral	Tunnel tibial
Âge	0,057	0,079
Genre	0,595	0,809
IMC	0,537	0,943

De plus, les paramètres chirurgicaux tels que la présence de lésions associées, le délai de prise en charge, la technique chirurgicale et le protocole de rééducation étaient analysés, mais aucune corrélation statistiquement significative n'a été observée avec la ballonisation des tunnels (Tableu.2).

Tableau 2. Étude de la corrélation de la ballonisation des tunnels avec les paramètres chirurgicaux.

	La valeur de P	
	Tunnel fémoral	Tunnel tibial
Présence de lésions associées	0,376	0,577
Délai de prise en charge	0,428	0,318
Technique chirurgicale	0,682	0,578
Protocole de rééducation	0,217	0,361

L'étude de la ballonisation du tunnel fémoral en fonction du footprint fémoral a montré que : pour les valeurs de la profondeur (P), les valeurs de la ballonisation ont augmenté en avançant le tunnel fémoral du postérieur (48,5 %) vers l'antérieur (56,8 %). La différence n'était pas significative avec $p = 0,791$. Pour la hauteur (H), les tunnels les plus hauts situés avaient une ballonisation supérieure à ceux ayant une position anatomique ; mais la différence n'était pas significative avec $P = 0,6$. L'étude de la ballonisation tibiale en fonction du footprint tibial a montré que les tunnels tibiaux ayant des footprints postérieurs avaient une ballonisation tibiale (47,48 %) supérieure à celle

des tunnels ayant un footprint anatomique (25 %). La différence n'était pas significative avec $p = 0,201$.

Lors de l'étude sur la ballonisation des tunnels en fonction de leurs orientations, il a été constaté que les tunnels fémoraux présentaient un taux de ballonisation de 21,9 % pour les orientations verticales, tandis que les orientations horizontales affichaient un taux de 51,4 %. Cependant, cette différence n'a pas atteint de signification statistique ($p = 0,7$). Relativement aux tunnels tibiaux, il a été observé un taux de ballonisation de 46,8 % pour les orientations verticales et de 51,4 % pour les orientations horizontales. Toutefois, cette différence était non plus statistiquement significative ($p = 0,98$).

Les résultats fonctionnels après l'opération ont montré que la flexion moyenne du genou est passée de 119,19° à 117,03° au suivi, sans perte significative ($p = 0,073$). L'extension était de 0° préopératoire et de 0,97° au suivi, également sans perte significative ($p = 0,13$). Le test de Lachman a montré une réduction de la laxité clinique, passant de 75,7 % des patients ayant une laxité évidente à 20% ayant une laxité fruste. Le ressaut a également diminué de 18,9 % à 2% des cas. Les scores de Tegner et de Lysholm ont diminué de 4,89 à 4,51 et augmenté de 61 à 91,27, respectivement. Cependant, le score IKDC a connu une augmentation significative ($p = 0,035$), passant de 52,09 à 73,24.

L'étude des résultats cliniques en fonction de la ballonisation des tunnels a révélé que le test de Lachman, les scores de Tegner, Lysholm et IKDC n'avaient pas de corrélation significative avec la ballonisation du tunnel fémoral ou tibial (Tableau.3).

Tableau 3. Étude de la corrélation des résultats cliniques avec la ballonisation des tunnels fémoraux et tibiaux.

	La valeur de P	
	Tunnel fémoral	Tunnel tibial
Test de Lachmann	0,401	0,672
Score de Tegner	0,587	0,494
Score de Lysholm	0,194	0,266
Score IKDC	0,5631	0,797

DISCUSSION

La revue de la littérature montre que (5) la ballonisation des tunnels est un phénomène précoce (dans les six premiers mois), puis stable jusqu'à deux ans. Selon Weber (6), elle évolue en parabole avec un plateau de stabilisation entre 6 et 24 semaines. Ses étiologies sont multifactorielles et peu claires, avec peu d'études sur les facteurs épidémiologiques. Lee et al. suggèrent que ce phénomène résulte d'une interaction complexe entre des facteurs mécaniques et biologiques (7).

Les études divergent sur l'impact de l'âge, du genre et du délai de chirurgie sur la ballonisation des tunnels après ligamentoplastie. Weber a associé un âge inférieur à 30 ans et le genre masculin à la ballonisation, tandis que les délais courts semblaient réduire le risque (6). Cependant, les conclusions de Kobayashi diffèrent, ne trouvant pas d'association avec l'âge, mais identifiant un élargissement plus important chez les femmes (8). Notre étude n'a pas montré de significativité pour l'âge avancé, le genre masculin, l'indice de masse corporelle et le délai de chirurgie. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour clarifier ces influences (9).

Les facteurs mécaniques favorisant la ballonisation des tunnels peuvent agir soit en augmentant les contraintes mécaniques sur le transplant et les parois du tunnel, soit en créant des micromouvements du transplant au sein de son tunnel, soit les deux mécanismes combinés. Une ancienne étude cadavérique menée par Markolf (10) a montré

que le greffon est exposé à des contraintes trois à quatre fois plus importantes qu'un LCA intact. D'autre part, le phénomène de ballonisation a été expliqué dans plusieurs publications par une anomalie de positionnement du footprint, ce qui entraîne une augmentation des contraintes mécaniques sur le greffon lors de la mobilisation du genou. Ceci dit que le fait que les footprints fémoral et tibial ne se superposent pas avec le couple de points isométriques respectifs, ça va augmenter les contraintes mécaniques exercées sur le greffon ainsi que sur les parois de ses tunnels, ce qui entraîne la ballonisation. Pour une position tibiale fixe, des variations millimétriques de l'insertion fémorale ont des effets importants sur la tension du greffon. Par rapport au point fémoral isométrique, un positionnement antérieur s'accompagne d'une mise en tension excessive en flexion, alors qu'un positionnement postérieur s'accompagne d'une détente du greffon en flexion (11). Il a été également démontré qu'un positionnement plus bas sur la face axiale du condyle fémoral latéral permettait une meilleure isométrie en rotation et donc diminue les contraintes (12).

Plusieurs études se sont intéressées à l'orientation des tunnels, selon la majorité des publications, le tunnel fémoral proche de l'horizontal offre plus de stabilité et contrôle mieux la rotation du tibia (13), mais il expose au phénomène de ballonisation (5). De même pour le tunnel tibial, un tunnel proche de horizontal est plus stabilisant mais il favorise la ballonisation par un double mécanisme : d'une part, par l'augmentation des contraintes à son orifice articulaire et d'autre part, par le changement de la forme de l'orifice articulaire qui devient elliptique est susceptible de créer des micromouvements par effet « essuie-glace » (14). Ceci dit qu'un équilibre entre la stabilité et la prévention de la ballonisation doit être instauré.

Concernant le type de fixation plusieurs auteurs s'accordent que la fixation corticale par l'Endobutton expose à des taux élevés de ballonisation (15). Ceci a été expliqué par l'effet tendeur résultant des mouvements longitudinaux de la portion tendineuse laissée libre dans le tunnel. En ce qui concerne la fixation par vis, plusieurs auteurs s'accordent sur la meilleure stabilité qu'elle offre au greffon. De plus, une position proche de l'orifice articulaire du tunnel, permet la diminution des micromouvements du greffon (16).

Concernant le type du greffon, Certaines études ont montré que le taux d'élargissement des tunnels est plus prononcé après la ligamentoplastie utilisant une interface os-tendon (17). Ceci était expliqué par le fait que la baguette osseuse du tendon patellaire permet un meilleur emmanchement et que la ligamentisation serait beaucoup plus rapide que pour la technique DIDT. Mais le tendon patellaire n'est pas aussi dénué d'effet sur le diamètre du tunnel. En effet, le diamètre de la baguette osseuse est souvent plus grand que la portion tendineuse. Ceci implique la formation d'un espace mort entre le greffon et le tunnel, favorisant ainsi le mouvement de balayage appelé « effet essuie-glace » qui est à l'origine de la ballonisation à l'entrée du tunnel (14). Plusieurs auteurs se sont intéressés à reconstituer les deux faisceaux du LCA et à étudier la répercussion anatomoclinique. Le phénomène de ballonisation a été rapporté dans peu de séries et les résultats sont jusqu'à présent controversés. Jarvela et al (18) ont conclu que le taux de ballonisation est moins prononcé au cours de la technique de doubles faisceaux avec le même type de greffon et une méthode de fixation identique. Par ailleurs, Achtnich (19) a mis en évidence que le taux de ballonisation est le même pour les deux techniques.

Concernant le protocole de rééducation fonctionnelle, certes une mobilisation précoce du genou permet de lutter contre la raideur et permet la récupération rapide de la force musculaire, mais peut aussi être la cause

de ballonisation des tunnels osseux (20). Notre étude a trouvé que la ballonisation était plus importante chez les patients ayant suivis un protocole de rééducation à chaîne ouverte d'emblée par rapport aux patients ayant suivis un protocole à chaîne fermée initialement ; mais la différence n'était pas significative. Des études comparatives entre les protocoles à chaînes ouverte et à chaîne fermée seraient fort intéressantes dans le futur pour éclaircir leur impact sur le phénomène de ballonisation.

Finalement, Peu de séries ont étudié l'influence des lésions associées à la rupture du LCA, dans le phénomène de ballonisation. Wilson (21) a suggéré que la présence de lésions associées de type méniscales ou de contusions osseuses pourrait augmenter le contenu du fluide synovial en cytokines stimulant ainsi la résorption osseuse. Dans notre travail, les patients présentant une atteinte isolée du LCA avaient une ballonisation fémorale et tibiale globale moyenne inférieure à celle des patients présentant des lésions méniscales associées, mais la différence n'était pas significative avec $p=0,376$ pour les tunnels fémoraux et $0,577$ pour les tunnels tibiaux.

CONCLUSION

Pour conclure, Selon notre étude, les facteurs qui semblaient favoriser la ballonisation étaient : l'âge avancé, le genre masculin, le retard de la chirurgie, les protocoles de rééducation accélérés, le placement non conforme des footprints du greffon et l'horizontalisation des tunnels.

Liste des abréviations:

DIDT: Droit Interne Demi-Tendineux

IKDC: International Knee Documentation Committee

IMC: Indice de Masse Corporelle

LCA: Ligament Croisé Antérieur

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences

RÉFÉRENCES

1. Fahey M, Indelicato PA. Bone tunnel enlargement after anterior cruciate ligament replacement. *Am J Sports Med.* 1994;22(3):410-4.
2. Clatworthy MG, Annear P, Bulow JU, Bartlett RJ. Tunnel widening in anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective evaluation of hamstring and patella tendon grafts. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* 1999;7(3):138-45.
3. M B, P H, H H, T C. Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg [Internet].* Winter 1997 [cité 3 juill 2023];10(1). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9051173/>
4. Amis AA, Jakob RP. Anterior cruciate ligament graft positioning, tensioning and twisting. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* 1998;6 Suppl 1:S2-12.
5. Ko YW, Rhee SJ, Kim IW, Yoo JD. The Correlation of Tunnel Position, Orientation and Tunnel Enlargement in Outside-in Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Knee Surg Relat Res.* déc 2015;27(4):247-54.
6. Weber AE, Delos D, Oltean HN, Vadasdi K, Cavanaugh J, Potter HG, et al. Tibial and Femoral Tunnel Changes After ACL Reconstruction: A Prospective 2-Year Longitudinal MRI Study. *Am J Sports Med.* mai 2015;43(5):1147-56.
7. Lee SS, Kim IS, Shin TS, Lee J, Lee DH. Femoral Tunnel Position Affects Postoperative Femoral Tunnel Widening after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with Tibialis Anterior Allograft. *J Clin Med.* janv 2023;12(5):1966.
8. Kobayashi M, Nakagawa Y, Suzuki T, Okudaira S, Nakamura T. A retrospective review of bone tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendons fixed with a metal round cannulated interference screw in the femur. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* oct 2006;22(10):1093-9.
9. Segawa H, Omori G, Tomita S, Koga Y. Bone tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring tendons. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* juill 2001;9(4):206-10.
10. Markolf KL, Burchfield DM, Shapiro MM, Cha CW, Finerman GA, Slauterbeck JL. Biomechanical consequences of replacement of the

anterior cruciate ligament with a patellar ligament allograft. Part II: forces in the graft compared with forces in the intact ligament. *J Bone Joint Surg Am.* nov 1996;78(11):1728-34.

11. Zavras TD, Race A, Amis AA. The effect of femoral attachment location on anterior cruciate ligament reconstruction: graft tension patterns and restoration of normal anterior-posterior laxity patterns. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* mars 2005;13(2):92-100.
12. Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SLY. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. 2002 Richard O'Connor Award paper. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* mars 2003;19(3):297-304.
13. Wang H, Fleischli JE, Hutchinson ID, Zheng NN. Knee moment and shear force are correlated with femoral tunnel orientation after single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* oct 2014;42(10):2377-85.
14. Höher J, Möller HD, Fu FH. Bone tunnel enlargement after anterior cruciate ligament reconstruction: fact or fiction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* 1998;6(4):231-40.
15. Simonian PT, Erickson MS, Larson RV, O'kane JW. Tunnel expansion after hamstring anterior cruciate ligament reconstruction with 1-incision EndoButton femoral fixation. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* oct 2000;16(7):707-14.
16. Rodeo SA, Kawamura S, Kim HJ, Dymybil C, Ying L. Tendon healing in a bone tunnel differs at the tunnel entrance versus the tunnel exit: an effect of graft-tunnel motion? *Am J Sports Med.* nov 2006;34(11):1790-800.
17. Webster KE, Feller JA, Hameister KA. Bone tunnel enlargement following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomised comparison of hamstring and patellar tendon grafts with 2-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA.* 2001;9(2):86-91.
18. Järvelä T, Moisala AS, Paakkala T, Paakkala A. Tunnel enlargement after double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective, randomized study. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* déc 2008;24(12):1349-57.
19. Achtnich A, Stiepani H, Forkel P, Metzloff S, Hänninen EL, Petersen W. Tunnel widening after anatomic double-bundle and mid-position single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* sept 2013;29(9):1514-24.
20. Iorio R, Di Sanzo V, Vadalà A, Conteduca J, Mazza D, Redler A, et al. ACL reconstruction with hamstrings: how different technique and fixation devices influence bone tunnel enlargement. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* nov 2013;17(21):2956-61.
21. Wilson TC, Kantaras A, Atay A, Johnson DL. Tunnel enlargement after anterior cruciate ligament surgery. *Am J Sports Med.* mars 2004;32(2):543-9.