

Kerkour Khelaf

Reconstruction du ligament croisé antérieur (LCA): Répercussions du choix du greffon sur la sensibilité proprioceptive du genou

Résumé

A partir d'une recherche de la littérature nous avons analysé les répercussions des plasties: au tendon rotulien (TR), au fascia-lata (TFL), au droit interne et demi-tendineux (DI-DT) sur la proprioception du genou (sens de la position et du mouvement articulaire). Si la chirurgie semble améliorer la sensibilité proprioceptive, elle n'a aucune influence sur la restauration de la sensation du mouvement. La récupération de la proprioception peut être améliorée par le port d'une genouillère, d'une contention adhésive collée (tape), l'utilisation de vibrations tendineuses, ou de techniques de rééducation recréant les images mentales du mouvement. Les techniques de renforcement musculaire et la reprogrammation neuromotrice améliorent la stabilité du genou mais pas la proprioception. Actuellement les procédures chirurgicales de reconstruction du LCA se focalisent plus sur les problèmes de biomécanique et devraient avoir plus de considération sur sa fonction neurosensorielle (ex: LCA possède 90% de mécanorécepteurs et 10% de terminaisons libres, à l'inverse le tendon rotulien possède 10% de mécanorécepteurs et 90% de terminaisons libres). Aucune reconstruction ne peut recréer les mécanorécepteurs du LCA.

Mots-clés:

Genou – LCA – Proprioception – Greffon – Reprogrammation neuromotrice

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 51 (2), 115–120, 2003

Summary

From a review of the literature we analysed the repercussions of the plasties of ACL: using grafts with the patellar tendon (TR), fascia-lata (TFL), and hamstrings (semitendinosus and gracilis) on the proprioception of the knee (joint position sense and kinesthesia of the movement). If the surgery seems to improve the joint position, she has any influence on the restoration of the kinesthesia. The recovery of the proprioception can be improved by wearing a brace, a tape, utilisation of tendinosus vibrations, and techniques of rehabilitation recreating the mental images of the movement. The techniques of muscular reinforcement improve the stability of the knee but not the proprioception. Currently the surgical procedures of reconstruction of the LCA are focused more on the problems of biomechanics and should have more consideration on its neurosensory function (ex: ACL has 90% of mechanoreceptors and 10% of free nerves, however the patellar tendon has 10% of mechanoreceptors and 90% of free nerves). No reconstruction of ACL can recreate the mechanoreceptors of the LCA.

Key words:

Knee – ACL – Proprioception – Graft – Neuromuscular Rehabilitation

Introduction

Les reconstructions du LCA les plus fréquentes utilisent le tendon rotulien (TR), le gracile (droit interne) et semi-tendineux (DI-DT), le quadriceps ou le fascia-lata (TFL). Chaque technique a ses partisans et ses indications. Ces ligamentoplasties ont-elles des répercussions sur la proprioception du genou?

La proprioception et la reprogrammation neuromotrice sont des notions distinctes qui font appel à une évaluation et à une prise en charge différentes. La sensibilité proprioceptive permet de décrire et de connaître la position du corps dans l'espace et des membres par rapport au corps. Elle exprime la sensation de position, de mouvement (*Joint Position Sense*) et de direction du mouvement (sens kinesthésique) et s'évalue sur un mode passif et actif [1, 2].

La proprioception peut être modifiée par différents paramètres: âge [3–5], arthrose [6–9] lésion ligamentaire/musculaire ou tendineuse [1], prothèse [9, 10], anesthésie [11], douleur, fatigue [12], instabilité, épanchement articulaire [13], sexe [14].

Dans le cadre particulier du croisé antérieur, divers travaux ont analysé les répercussions de sa lésion et de sa reconstruction sur la sensibilité proprioceptive du genou [15–26].

Bien que toutes deux soient altérées lors de la lésion ligamentaire et de sa reconstruction chirurgicale, il ne faut pas confondre *proprioception* et *reprogrammation neuromotrice*.

Tests d'évaluation de la proprioception du genou

1. *Mode actif* (fig. 1): Sujet assis sur une table d'examen, sans contact de la face postérieure du genou avec la table. *Yeux fermés*. L'examineur place lentement et *passivement* le membre sain dans une position de flexion du genou [60-15-0] puis demande au sujet de replacer *activement* son genou lésé dans la même position que son genou sain. Puis on mesure la différence articulaire entre les deux genoux (fig. 2).
2. *Mode passif*: Même position que pour le test actif. L'examineur place lentement et *passivement* le membre sain dans une position de flexion du genou [60-15-0] puis déplace *passivement*, à vitesse lente, le segment jambier lésé (prise malléolaire) vers la même position que le genou sain. Lorsque le sujet perçoit qu'il se trouve dans la même position que le genou sain on stoppe, puis on mesure la différence goniométrique entre les deux genoux.



Figure 1: Exemple de test actif de proprioception. Le sujet est assis sur une table d'examen, sans contact de la face postérieure du genou avec la table. Les yeux sont fermés. L'examineur place lentement et passivement le membre sain dans une position de flexion du genou (entre 30 et 60°) puis demande de replacer activement son genou lésé dans la même position que son genou sain.



Figure 2: On note la différence articulaire entre les deux genoux.

Pour Friden [27], ces tests ont une meilleure reproductibilité à 20° de flexion du genou. Borsa [28] montre que lors des tests, le déficit est plus sensible vers 15° d'extension et en déplaçant le segment jambier de la flexion vers l'extension. Good [29] teste la proprioception en position debout, en charge. Il obtient une «surestimation» des 2 côtés. Pour lui, les signaux afférents qui sont compromis par une lésion aiguë du LCA sont négligeables en comparaison des signaux afférents fournis par les autres articulations et par les récepteurs musculaires.

Les récepteurs de la proprioception au niveau du LCA

Les récepteurs de la proprioception sont cutanés, articulaires (type I, II, III, IV: Ruffini, Pacini, organes tendineux de Golgi, terminaisons libres) et musculaires (I, Ia, Ib). Ce qui caractérise les mécanorécepteurs est leur adaptation (vitesse lente-rapide, accélération-décélération, changement de direction ou au degré de tension...). Leur réponse est maximale aux amplitudes articulaires extrêmes, au genou la rotation externe accentue la décharge des mécanorécepteurs.

Schultz [30] est un des premiers à identifier la présence de mécanorécepteurs dans le LCA humain. Il suggère la possibilité

d'un rôle proprioceptif pour le LCA. Trois structures nerveuses distinctes peuvent y être identifiées [31]: corpuscules et terminaisons de Ruffini, organes tendineux de Golgi et corpuscules de Pacini (les plus nombreux), ainsi que quelques terminaisons nerveuses libres. La majorité des structures nerveuses est localisée dans le tissu synovial ou enfermée dans les structures endothéliales et constitue 1% du total de la surface ligamentaire [32]. Les insertions tibiales et fémorales ont les plus grandes densités de récepteurs comparativement à la partie moyenne. Un petit contingent de récepteurs type Golgi est également trouvé sur la surface du ligament [33]. Raunest [34] montre que les mécanorécepteurs du LCA ont des afférences pour les muscles de la cuisse (rôle d'inhibition antalgique de la contraction musculaire en cas de douleurs ou de lésion). En cas de lésion du LCA, la perturbation de la sensibilité proprioceptive semble plus à attribuer à la lésion ligamentaire qu'à l'atrophie musculaire.

Caractéristiques des greffons utilisés dans la reconstruction du LCA

1. Tendon rotulien

Il est une partie principale de l'appareil extenseur du genou. Il possède quelques mécanorécepteurs. Le site de prélèvement peut présenter des douleurs, une fragilisation pouvant aggraver la perturbation de la proprioception. Dans ce contexte, ce type de plastie ne devrait pas être utilisée chez un patient présentant déjà en préopératoire une morphologie en flexum important ou des douleurs fémoro-patellaires.

Fremerey [18, 19] compare la proprioception préopératoire à 3, 6 mois et à 3,9 ans, après chirurgie arthroscopique ou à ciel ouvert. En préopératoire, il existe une différence significative dans les deux groupes comparativement au côté sain. A 6 mois, les deux groupes montrent une restitution de la proprioception en flexion et extension totale. En position moyenne la proprioception n'est pas restaurée. A 3,9 ans, le déficit en position moyenne persiste encore. Il n'y a pas de différence sur la proprioception, les résultats cliniques et la stabilité entre chirurgie par voie arthroscopique ou à ciel ouvert. La perturbation de la proprioception (la rééducation seule ne pouvant restaurer la proprioception) influe sur le degré de satisfaction du patient.

Valeriani [25] compare des patients avant chirurgie, puis après chirurgie arthroscopique. En préopératoire, tous les patients présentent une diminution significative de proprioception. La reconstruction arthroscopique améliore la proprioception mais pas la conduction somato-sensorielle centrale. La perte des mécanorécepteurs peut être suivie par des modifications du système nerveux central ne pouvant être compensées par les autres structures nerveuses.

Contrairement au LCA, le tendon rotulien possède 90% de terminaisons libres et 10% de mécanorécepteurs.

2. Le DIDT

Le *Gracile*, muscle de la patte d'oie, est adducteur de hanche et rotateur médial du genou. Il contrôle le valgus du genou (stabilisateur du compartiment médial) et décélérateur de la rotation latérale (travail en mode excentrique en chaîne cinétique fermée).

Le *Semi-tendineux* est un muscle du groupe des ischio-jambiers. Il est extenseur pour la hanche. Au niveau du genou il fait partie des muscles de la patte d'oie et possède, au niveau du genou, la même fonction que le DI. Comme son nom l'indique, la moitié du muscle est du tendon.

Remarque: Ces 2 muscles ont un rôle proprioceptif très important (présence de nombreux mécanorécepteurs tendineux et musculaires). La patte d'oie a un rôle fonctionnel capital au niveau du genou en relation avec la hanche puisque nous avons un extenseur de hanche le DT, un adducteur (le DI) et un fléchisseur (le Sartorius ou couturier).

A moyen terme, on peut imaginer, sur le plan de la fonction proprioceptive active et/ou passive, l'effet délétère de l'utilisation de ce type de greffon. Ce type de plastie ne devrait pas être utilisée

chez un patient présentant une morphologie en genu-valgum importante.

Spicer [35] montre la présence de douleurs antérieures du genou après reconstruction au DIDT : 50% des patients ont des perturbations de la sensibilité sur la partie antérieure du genou et 86% de ceux là montrent un changement dans la distribution sensitive de la branche infra-géniculée du nerf saphène; ce qui entraîne des troubles de la proprioception.

Ochi [36] détecte autant de potentiels évoqués somato-sensoriels dans tous les ligaments reconstruits (recul post-opératoire de 18 mois) par DIDT que chez les sujets sains. Ces potentiels n'étaient détectables que dans 15 cas sur 32 dans le groupé lésé, non reconstruit. La reconnaissance de la position articulaire dans 17/32 genoux augmente de façon significative. Il semblerait qu'il existe une réinnervation sensorielle lors de la reconstruction d'un LCA humain au DIDT.

Nous savons que les ischios-jambiers sont les protecteurs du LCA. Limbird [37] et Solomonow [38] soulignent l'importance de ces muscles dans la compensation d'une déficience du LCA et suggèrent que le sacrifice de ces tendons est une grave erreur, tant pour la rééducation que pour la proprioception.

Dans un article récent, Tsuda [39] en stimulant électivement le LCA, montre l'existence d'un arc réflexe, afférent et efférent, entre le LCA et les ischios-jambiers (biceps fémoral et demi-tendineux). Cet arc réflexe disparaît après anesthésie du genou. Il souligne qu'actuellement les procédures chirurgicales de reconstruction du LCA se focalisent plus sur des problèmes de biomécanique et ont moins de considération pour sa fonction neuro-sensorielle.

3. Fascia-lata

Tendu du muscle tenseur jusqu'au tubercule infra-condyloire (de Gerdy), il a un rôle de stabilisateur au niveau de la hanche, mais surtout il participe au contrôle du varus du genou. Aucune étude n'a analysé l'existence de mécanorécepteurs au niveau du fascia-lata. Sa fonction stabilisatrice lui confère certainement un rôle proprioceptif moindre au niveau du genou que pour les autres muscles à caractéristique à la fois statique et dynamique.

Ce type de plastie ne devrait pas être utilisée chez un patient présentant une morphologie en genu varum importante.

L'étude de ces différents transplants comparée à la physiologie du LCA montre bien: «Qu'aucune reconstruction ligamentaire du LCA ne peut recréer et restaurer les propriocepteurs du genou [40].»

Amélioration de la proprioception par les techniques de rééducation (fig. 3, 4 et 5)

Le bandage élastique (contention adhésive et/ou genouillère) Divers travaux montrent qu'il est possible d'améliorer jusqu'à 40% la proprioception passive et/ou active par la prescription d'une genouillère élastique chez un sujet présentant des troubles de la proprioception [41-45]. Risberg [46] étudie à 2 ans post-opératoire la proprioception de genoux reconstruits par test passif à 15° de flexion, avec et sans genouillère. Il ne retrouve pas d'amélioration significative. Il aurait été sans doute plus utile d'étudier la proprioception aussi sur un mode actif. Il est à noter qu'une ponction articulaire dans le cas d'un épanchement améliore la proprioception sur un mode passif mais pas actif [13]. D'où l'importance d'avoir toujours un genou «sec» pour favoriser la proprioception passive mais également éviter l'amyotrophie [47].

L'assistance vibratoire tendineuse

La vibration d'un tendon entre 70 et 100 Hz (sans contrôle de la vue) entraîne une sensation d'allongement du muscle correspondant à une illusion du mouvement (sensation dans le sens opposé du mouvement).

Image mentale du mouvement

Comme préconisé dans certaines techniques de rééducation (ex: méthode de Feldenkrais), le sujet recrée mentalement, les yeux fermés, des images de sensations de mouvement ou de position

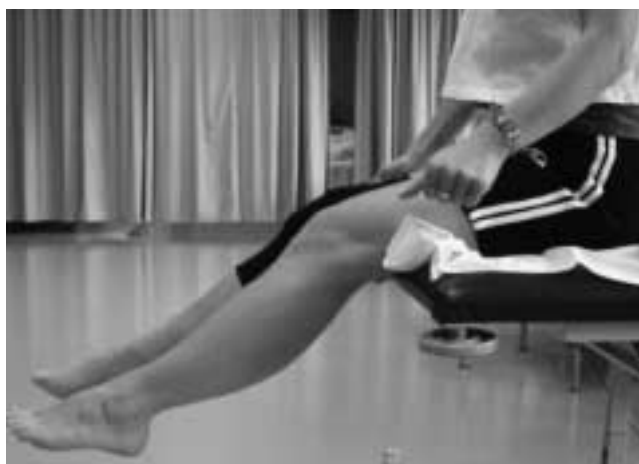


Figure 3: Amélioration de la proprioception par l'utilisation d'une genouillère élastique.



Figure 4: Noter la différence de position articulaire entre les 2 genoux (par contrôle de hauteur des 2 talons).



Figure 5: Amélioration par la pose d'une contention adhésive élastique.

articulaire (utilisation de patins à roulettes, skate ballon...). Les descendeurs professionnels au ski connaissent bien cette technique qui consiste, avant le départ, à «voir» leur descente et d'imaginer les différentes portes à franchir.

La reprogrammation neuromotrice

Elle a pour but final de placer le patient dans les conditions d'informations sensorielles propres au déclenchement et à l'exécution de ses principaux programmes moteurs (tableau 1).

Iconographie:**VITESSE D'EXÉCUTION**

- lente
- modérée
- rapide

CHAÎNE CINÉTIQUE

- ouverte
- émi-fermée (mono ou bipodale)
- fermée (mono ou bipodale)

COURSE MUSCULAIRE

- interne
- moyenne (secteur de force)
- externe

MODE CONTRACTILE

- excentrique
- concentrique
- statique
- combiné (type pliométrique par exemple)

MOTRICITÉ

- réflexe
- automatique
- volontaire
- (informations psycho-sensorielles)

VOIES D'INFORMATIONS SENSORIELLES*** EXTÉROCÉPTIVES**

- vue
- ouïe (commandements verbaux ou non)
- toucher (zone de contact: appui taligrade, digitigrade...)

*** INTEROCÉPTIVES**

- vestibulaire
- récepteurs articulaires
- récepteurs musculotendineux

Tableau 1: Principaux critères d'établissement d'un programme de reprogrammation neuromotrice du genou. La sélection est faite en tenant compte du niveau et des besoins du patient, des délais de cicatrisation, du contexte douloureux et/ou inflammatoire.

Par la stimulation des récepteurs (articulaires, musculaires et cutanés), le sujet passe par une étape d'apprentissage, puis d'anticipation avant d'automatiser le geste.

Les muscles doivent se trouver dans un état de vigilance préalable afin d'être en mesure d'éviter les effets nocifs d'un changement brutal d'exécution du geste. Ceci fait entrer en compte la notion bien connue de «raideur musculaire active» avec phénomène d'anticipation.

Elle permet un développement du potentiel neuromusculaire et, sans être une finalité, constitue néanmoins une étape souvent obligatoire [48].

La reprogrammation neuromotrice doit être adaptée à la technique thérapeutique retenue, à l'objectif moteur du patient et aux délais de cicatrisation. Les techniques de reprogrammation neuromotrice doivent débiter le plus précocement quelque soit le type de plastie utilisée. Idéalement le programme doit être enseigné en préopératoire (documenter le déficit de proprioception) et repris dès la sortie du bloc opératoire. Les techniques à visée d'éveil musculaire doivent permettre de restaurer le plus précocement possible des contractions musculaires (l'électrostimulation de très basse fréquence 1 à 5 hz est un excellent adjuvant). L'évaluation EMG du quadriceps deux jours après ligamentoplastie au TR ou DIDT ne semble pas mettre en évidence de lien statistiquement significatif entre le type de ligamentoplastie et le déficit de recrutement du quadriceps [49].

Il a été mis en évidence que le temps de contraction à visée protectrice [50] d'un muscle à la suite d'une information venant d'un récepteur proprioceptif est trop long (8 à 10 fois supérieur) pour protéger l'articulation. Pour Fitzgerald [51], un traitement rééducatif à visée neuromotrice (*perturbation training*) diminue les risques d'épisodes d'instabilité du genou (fig. 6, 7 et 8).

Jerosch [21] a bien montré que les capacités proprioceptives d'un genou opéré sont significativement réduites 6,42 semaines après la reconstruction du LCA. Ce déficit peut être amélioré par un programme spécifique de rééducation.



Figure 6: Reprogrammation neuromotrice sur plan instable.



Figure 7: Reprogrammation neuromotrice sur plan instable en flexion-valgus-rotation externe.



Figure 8: Reprogrammation neuromotrice sur plan instable en flexion-varus-rotation interne.



Figure 9: Reprogrammation «neuroproprioceptive» sur plan instable avec contention adhésive élastique.

Carter [16] souligne que si la stabilité augmente avec les exercices de reprogrammation neuromotrice, la proprioception quant à elle n'est pas améliorée.

Pour Bouët [2], les exercices de renforcement musculaire augmentent la proprioception ainsi que la rééducation en charge précoce [28, 29].

Si nous voulons des exercices qui améliorent à la fois la proprioception et la reprogrammation neuromotrice, il est possible de pratiquer un ensemble d'exercices adaptés du *tableau 1*, en protégeant l'articulation avec une genouillère ou une contention adhésive collée. Nous réalisons ainsi des programmes de «rééducation neuroproprioceptive» (fig. 9).

Conclusion

La littérature montre que la lésion du LCA perturbe la proprioception du genou (sensation de position et de mouvement articulaire) et qu'aucune reconstruction ne peut la rétablir complètement. Quelle que soit la technique utilisée, il n'est pas possible de recréer la physiologie normale des propriocepteurs (mécanorécepteurs) du genou. Il faut tenir compte des lésions associées (ligamentaires, méniscales, épanchement, arthrose...), des douleurs, de l'instabilité qui peuvent augmenter le déficit de proprioception.

Le choix du greffon ne doit pas risquer d'augmenter le déficit proprioceptif si ce dernier est très important en préopératoire. Il semble que la technique au DIDT soit la plus susceptible d'augmenter le déficit proprioceptif, suivie par la technique au tendon rotulien.

Sur le plan rééducatif, l'amélioration de la proprioception peut être obtenue par l'utilisation d'un bandage élastique (genouillère ou contention adhésive), de vibrations tendineuses et de techniques de visualisation d'images mentales du mouvement. Ceci doit être associé à une reprogrammation neuromotrice sur plans instables et à un programme de renforcement musculaire spécifique pour obtenir une véritable reprogrammation «neuroproprioceptive».

Adresse de correspondance:

Kerkour Khelaf, cadre de santé, physiothérapeute-chef, Hôpital du Jura, site de Delémont, 2800 Delémont,
e-mail: khelaf.kerkour@h-ju.ch

Bibliographie

- 1 Lephart S.M., Pinciveiro D.M., Giraldo J.L., Fu F.H.: The role of proprioception in the management and rehabilitation of athletic injuries. *Am. J. Sports Med.*, 1997; 25 (1): 130–137.
- 2 Bouët V., Gahéry Y.: Muscular exercise improves knee position sense in humans. *Neuroscience Letters*, 2000; 289: 143–146.
- 3 Bullock-Saxton J.E., Wong W.J., Hogan N.: The influence of age on weight-bearing joint reposition sense of the knee. *Exp. Brain Res.*, 2001; 136 (3): 400–406.
- 4 Pai Y.C., Rymer W.Z., Chang R.W., Sharma L.: Effect of age and osteoarthritis on knee proprioception. *Arthritis Rheum.*, 1997; 40 (12): 2260–2265.
- 5 Koralewicz L.M., Engh G.A.: Comparison of proprioception in arthritic and age-matched normal knees. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 2000; 82 (11): 1582–1588.
- 6 Gardsen L.R., Bullock-Saxton J.E.: Joint reposition sense in subjects with unilateral osteoarthritis of the knee. *Clin. Rehabil.*, 1999; 13 (2): 148–155.
- 7 Pap G., Machner A., Awiszus F.: Influence of retropatellar arthrosis on the proprioceptive ability of patients with gonarthrosis. *Orthopade.*, 1998; 27 (9): 619–624.
- 8 Weiler H.T., Pap G., Awiszus F.: The role of joint afferent in sensory processing in osteoarthritic knees. *Rheumatology*, 2000; 39 (8): 850–856.
- 9 Ishii Y., Terajima K., Terashima S., Bechtold J.E., Laskin R.S.: Comparison of joint position sense after total knee arthroplasty. *J. arthroplasty*, 1997; 12 (5): 541–545.
- 10 McChesney J.W., Woollacott M.H.: The effect of age-related declines in proprioception and total knee replacement on postural control. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, 2000; 55 (11): 658–666.
- 11 Barrack R.L., Skinner H.B., Brunet M.E., Haddad R.J.: Functional performance of the knee after intraarticular anesthesia. *Am. J. Sports Med.*, 1983; 11 (4): 258–261.
- 12 Lattanzio P.J., Petrella R.J., Sproule J.R., Fowler P.J.: Effects of fatigue on knee proprioception. *Clin. Sports Med.*, 1997; 7 (1): 22–27.
- 13 Guido J., Voight M.L., Blackburn T.A., Kidder J.D., Nord S.: The effects of chronic effusion on knee joint proprioception: a case study. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1997; 25 (3): 208–212.
- 14 Marks R., Quinney H.A., Wessel J.: Proprioceptive sensibility in women with normal and osteoarthritic knee joints. *Clin. Rheumatol.*, 1993; 12 (2): 170–175.
- 15 Barrack R.L., Skinner H.B., Buckley S.L.: Proprioception in the anterior cruciate deficient knee. *Am. J. Sports Med.*, 1989; 17 (1): 1–6.
- 16 Carter N.D., Jenkinson T.R., Wilson D., Jones D.W., Torode A.S.: Joint position sense and rehabilitation in the anterior cruciate ligament deficient knee. *Br. J. Sports Med.*, 1997; 31 (3): 209–212.
- 17 Friden T., Roberts D., Zatterstrom R., Lindstrand A., Moritz U.: Proprioceptive defects after an anterior cruciate ligament rupture – the relation to associated anatomical lesions and subjective knee function. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 1999; 7 (4): 226–231.
- 18 Fremery R., Lobenhoffer P., Skutek M., Gerich T., Bosch U.: Proprioception in anterior cruciate ligament reconstruction. Endoscopic versus open two-tunnel technique. A prospective study. *Int. J. Sports Med.*, 2001; 22 (2): 144–148.
- 19 Fremery R., Lobenhoffer P., Zeichen J., Skutek M., Bosch U., Tsherne H.: Proprioception after rehabilitation and reconstruction in knees with deficiency of the anterior cruciate ligament: a prospective, longitudinal study. *J. Bone Joint Surg. Br.*, 2000; 82 (6): 801–806.
- 20 Fischer-Asmussen T., Jensen P.E.: Proprioceptive sensitivity and performance in anterior cruciate ligament-deficient knee joints. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 2000; 10 (2): 85–89.
- 21 Jerosch J., Pfaff G., Thorwesten L., Schoppe R.: Effects of a proprioceptive training program on sensorimotor capacities of the lower extremity in patients with anterior cruciate ligament instability. *Sportverletzungen, Sportschäden*, 1998; 12 (4): 121–130.
- 22 Pap G., Machner A., Nebelung W., Awiszus F.: Detailed analysis of proprioception in normal and anterior cruciate ligament deficient knees. *J. Bone Joint Surg. Br.*, 1999; 81 (5): 764–768.
- 23 Roberts D., Friden T., Stomberg A., Lindstrand A., Moritz U.: Bilateral proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between patients and healthy individuals. *J. Orthop. Res.*, 2000; 18 (4): 565–571.
- 24 Roberts D., Friden T., Zatterstrom R., Lindstrand A., Moritz U.: Proprioceptive in people with anterior cruciate ligament-deficient

- knees: comparison of symptomatic and asymptomatic patients. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1999; 29 (10): 587–594.
- 25 Valeriani M., Restuccia D., Di Lazzaro V., Franceschi F., Fabbriani C., Tonali P.: Clinical and neurophysiological abnormalities before and after reconstruction of the anterior cruciate ligament of the knee. *Acta Neurol. Scand.*, 1999; 99 (5): 303–307.
 - 26 Mc Donald P.B.: Proprioception in ACL deficient and reconstructed knees. *Am. J. Sports Med.*, 1996; 24 (6): 774–778.
 - 27 Friden T., Roberts D., Zatterstrom R., Lindstrand A., Moritz U.: Proprioception in the nearly extended knee. Measurements of position and movement in healthy individuals and in symptomatic anterior cruciate ligament injured patients. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 1996; 4 (4): 217–224.
 - 28 Borsari P.A., Lephart S.M., Irrgang J.J., Safran M.R., Fu F.H.: The effects of joint position and direction of joint motion on proprioceptive sensibility in anterior cruciate ligament-deficient athletes. *Am. J. Sports Med.*, 1997; 25 (3): 336–340.
 - 29 Good L., Roos H., Gottlieb D.J., Renstrom P.A., Beynon B.D.: Joint position sense is not changed after acute disruption of the anterior cruciate ligament. *Acta Orthop. Scand.*, 1999; 70 (2): 194–198.
 - 30 Schultz R.A., Miller D.C., Kerr C.S., Micheli L.: Mechanoreceptors in human cruciate ligaments. A histologic study. *J. Bone Joint Surg.*, 1984; 66A: 536–541.
 - 31 Raunest J., Sager M., Burgener E.: Proprioception of the cruciate ligaments: an mapping in an animal model. *Arch. Orthop. Trauma. Surg.*, 1998; 118 (3): 159–163.
 - 32 Kennedy J.C., Alexander I.J., Hayes K.C.: Nerve supply of the human knee and its functional importance. *Am. J. Sports Med.*, 1982; 10: 329–335.
 - 33 Schutte M.J., Dabiezis E.J., Zimny M.L., Happel L.T.: Neural Anatomy of the Human ACL. *J. Bone Joint Surg.*, 1987; 69A: 243–247.
 - 34 Raunest J., Sager M., Burgener E.: Proprioceptive mechanisms in the cruciate ligaments: an electromyographic study on reflex activity in the thigh muscles. *J. Trauma*, 1996; 41 (3): 488–493.
 - 35 Spicer D.D., Blagg S.E., Unwin A.J., Allum R.L.: Anterior knee symptoms after four-strand hamstring tendon anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 2000; 8 (5): 286–289.
 - 36 Ochi M., Iwasa J., Uchio Y., Adachi N., Sumen Y.: The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J. Bone Joint Surg. Br.*, 1999; 81(5): 902–906.
 - 37 Limbird T.J., Shiavi R., Frazer M., Borra H.: EMG profiles of knee joint musculature during walking: changes induced by ACL deficiency. *J. Orthop. Res.*, 1988; 6: 630–638.
 - 38 Solomonow M., Baratta R., Zhou B.H., Shoji H., Bose W., Beck C., D'Ambrosia R.: The synergistic action of the ACL and thigh muscles in maintaining joint stability. *Am. J. Sports Med.*, 1987; 15: 207–213.
 - 39 Tsuda E., Okamura Y., Otsuka H., Komatsu T., Tokuya S.: Direct evidence of the anterior cruciate ligament-hamstring reflex arc in humans. *Am. J. Sports Med.*, 2001; 29 (1): 83–87.
 - 40 Jerosch J., Schaffer C., Prymka M.: Proprioceptive abilities of surgically and conservatively treated knee joints with injuries of the cruciate ligament. *Unfallchirurg.*, 1998; 101 (1): 26–31.
 - 41 Jerosch J., Prymka M.: Knee joint in normal volunteers and patients with anterior cruciate ligament tears, taking special account of the effect of a knee bandage. *Arch. Orthop. Trauma Surg.*, 1996; 115 (3–4): 162–166.
 - 42 Jerosch J., Schmidt K., Prymka M.: Proprioceptive capacities of patients with retropatellar knee pain with special reference to effectiveness of an elastic bandage. *Unfallchirurg.*, 1997; 100 (9): 719–723.
 - 43 McNair P.J., Stanley S.N., Strauss G.R.: Knee bracing: effects of proprioception. *Arch. Med. Phys. Rehabil.*, 1996; 77 (3): 287–289.
 - 44 Birmingham T.B., Kramer J.F., Kirkley A., Inglis J.T., Spaulding S.J., Vandervoort A.A.: Knee bracing for medial compartment osteoarthritis: effects on proprioception and postural control. *Rheumatology (Oxford)*, 2001; 40 (3): 285–289.
 - 45 Perla R., Franck C., Fick G.: The effect of elastic bandages on human knee proprioception in the uninjured population. *Am. J. Sports Med.*, 1995; 23 (2): 251–255.
 - 46 Risberg M.A., Beynon B.D., Peura G.D., Uh B.S.: Proprioception after anterior cruciate ligament reconstruction with and without bracing. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 1999; 7 (5): 303–309.
 - 47 Fahrer H., Rentsch H.U., Gerber N.J., Beyeler C., Hess C.W., Grünig B.: Knee effusion and reflex inhibition of the quadriceps. A bar to effective retraining. *J. Bone Joint. Surg.*, 1988; 70B: 635–638.
 - 48 Chatrenet Y., Kerkour K.: In: Rééducation des lésions ligamentaires du genou chez le sportif, eds. Paris; Masson, 1996; 56–59.
 - 49 Rioualen L., Vaillant J., Pavan P.: Etude électromyographique du quadriceps deux jours après ligamentoplastie du croisé antérieur. *Ann Kinésithér.*, 2003; 17–18, 27–32.
 - 50 Pope M.H., Johnson R.J., Brown D.W., Tighe C.: The role of the musculature in injuries to the medial collateral ligament. *J. Bone Joint Surg.*, 1979; 61A: 398–402.
 - 51 Fitzgerald G.K., Axe M.J., Snyder-Mackler L.: The efficacy of perturbation training in nonoperative anterior cruciate ligament rehabilitation programs for physical active individuals. *Phys. Ther.*, 2000; 80 (5): 526–527.