

Importance des profils sensoriels dans le cadre de la prise en charge physiothérapeutique des traumatismes du ligament croisé antérieur.

Éléments théoriques et applicatifs

The Importance of Sensory Profiles in the Physiotherapeutic Management of ACL Injuries: Theoretical and Practical Considerations

(Abstract on page 21)

Die Bedeutung sensorischer Profile im Rahmen der physiotherapeutischen Behandlung von Verletzungen des vorderen Kreuzbandes. Theoretische und praktische Überlegungen

(Zusammenfassung auf Seite 22)

Brice Picot (PhD, PT)^{1,2}, Nicolas Forestier (PhD, HDR)¹

Mains Libres 2023; 1: 15-24 | DOI: 10.55498/MAINSLIBRES.2023.11.1.15

MOTS CLÉS proprioception / repondération sensorielle / contrôle articulaire / vibration tendineuse

RÉSUMÉ

Introduction: Bien que la proprioception soit utilisée dans le champ de la pratique clinique, certaines ambiguïtés demeurent concernant les méthodes et les exercices mis en place. Si les protocoles de mesure de l'acuité proprioceptive sont connus ceux relatifs aux capacités d'intégration proprioceptive le sont moins.

Objectifs: Cet article de synthèse s'attache à présenter l'origine des différences dans le domaine de l'intégration proprioceptive et ses liens avec les traumatismes du genou. Il s'agit de présenter les approches pouvant être mises en place par les praticiens pour améliorer la prise en charge et la prévention des blessures.

Développement: L'existence de modifications de l'activité cérébrale consécutives à des lésions du LCA associées à des déficits de contrôle postural est liée à des altérations de la pondération sensorielle. Il est possible de catégoriser deux types de profils selon l'évolution des capacités de plasticité proprioceptive dans différentes conditions d'équilibration. Le premier se caractérise par une repondération en direction des entrées proprioceptives d'origine lombaire. Le second se caractérise par une augmentation du recours aux signaux proprioceptifs originaires de la cheville bien que la fiabilité de ces signaux diminue dans ces conditions d'instabilité. Cette absence de plasticité proprioceptive pourrait jouer un rôle dans le risque de blessures au membre inférieur telle que la lésion du ligament croisé antérieur.

Conclusion: L'existence d'une variabilité importante des stratégies posturales justifie le fait qu'il faille qualifier les patients selon ce critère afin d'obtenir une efficacité optimale dans la prévention et la rééducation des blessures.

¹ Université Savoie Mont-Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la motricité EA 7424, 73000 Chambéry, France

² Société Française des Masseurs-Kinésithérapeutes du Sport (SFMKS Lab), Pierrefite sur Seine, France.

INTRODUCTION

Avec la vision et la fonction vestibulaire la proprioception, que l'on appelle également sensibilité profonde, est un des éléments essentiels du contrôle de la posture et du mouvement. La proprioception est issue d'un ensemble de cellules spécialisées, les mécanorécepteurs, localisés principalement au niveau des muscles et des tendons (les fuseaux neuromusculaires ou FMN et les organes tendineux de Golgi ou OTG), des structures péri-articulaires et de la peau (corpuscules de Ruffini, Paccini). Ces capteurs alimentent le système nerveux central (SNC) en signaux qui renvoient aux valeurs de longueur et de vitesse de variation de longueur des complexes musculo-tendineux, de tension musculaire et de pression cutanée. Après intégration, ces afférences sensorielles contribuent au contrôle de la posture, à la stabilité des articulations, et à plusieurs sensations conscientes. Plus précisément les signaux proprioceptifs sont à la base i) d'une sensibilité positionnelle (statesthésie) qui permet de déterminer la configuration de chaque articulation et par extension la position relative des membres entre eux et par rapport au corps ii) d'une sensibilité au mouvement (kinessthésie) qui offre un accès aux composantes de vitesse, d'amplitude et de direction du mouvement et iii) d'une sensibilité à la force qui permet notamment d'estimer le niveau de force développée.

Des traumatismes articulaires (entorses, ruptures ligamentaires) ou musculaires s'accompagnent généralement d'un dysfonctionnement du système proprioceptif qui se caractérise par des troubles de l'équilibre, des troubles de la posture et du contrôle du mouvement de manière générale. Le professionnel de santé (kinésithérapeute, physiothérapeute) inclus ainsi dans sa procédure de rééducation des éléments proprioceptifs sous la forme de techniques de réapprentissage neuromusculaire. Appliquées au niveau d'une articulation ou d'un segment qui présente une instabilité musculo-ligamentaire, ces techniques ont comme objectif principal d'aider les patients à recouvrer une proprioception efficace capable de contrôler leur motricité dans la vie quotidienne ou dans leurs activités sportives.

Bien que ces méthodes proprioceptives soient largement utilisées dans le champ de la pratique clinique, certaines ambiguïtés demeurent concernant les méthodes et les exercices mis en place. A titre d'exemple, l'utilisation de plateaux de déstabilisation dans le cadre de la rééducation proprioceptive des entorses latérales de la cheville ne s'accompagne pas, comme cela est largement pensé, d'une meilleure utilisation des informations proprioceptives originaires de l'arrière-pied⁽¹⁾. L'autre domaine qui souffre d'une approximation est celui de l'évaluation de la proprioception. Il est fondamental pour le praticien de procéder à des évaluations de l'acuité proprioceptive des patients en cours de traitement afin de restaurer au mieux leurs compétences. Classiquement des tests cliniques comme les tests de repositionnement articulaires sont utilisés. Toutefois, le rôle de la proprioception est également déterminé par l'intégration et l'utilisation de ces informations dans le contrôle moteur^(2,3). Autrement dit, l'étude de la proprioception doit comprendre d'une part l'évaluation de la capacité que possède un individu à capter les signaux sensoriels (mesure de l'acuité proprioceptive), et d'autre part une évaluation de ses capacités à intégrer ces signaux pour contrôler sa motricité.

Si les protocoles de mesure de l'acuité proprioceptive sont bien connus et globalement bien maîtrisés par les professionnels de santé, ceux relatifs aux capacités d'intégration proprioceptive le sont moins. Ils permettent par exemple de constater les défauts de contrôle associés à certaines pathologies comme les lombalgies ou l'instabilité chronique de cheville. Ils permettent également d'identifier des individus aux profils particuliers, capables de moduler (ou pas) leur utilisation des sources proprioceptives afin de contrôler leurs articulations en fonction du contexte.

Évaluer les profils d'intégration sensorielle prend tout son sens dans le domaine de la réhabilitation. En effet, la littérature assigne depuis quelques années au SNC une place prédominante dans la compréhension des facteurs de risque de blessures. C'est particulièrement le cas pour l'atteinte du ligament croisé antérieur (LCA) consécutive à la pratique du handball, activité largement investiguée par des équipes de recherche scandinave depuis plus de 20 ans^(4,5).

L'entorse du LCA est une pathologie traumatique majeure dans la pratique de ce sport⁽⁶⁾. Estimée à 0,7-2,8 chez les femmes et 0,2-0,8 pour 1000h de pratique chez les hommes^(7,8), le handball est en effet considéré comme le sport le plus pourvoyeur de ruptures de LCA avec le volleyball⁽⁹⁾. On retrouve une large prédominance féminine dans la survenue de cette lésion, avec en moyenne 3 à 5 fois plus de blessures chez les femmes^(6,10,11). De plus, la plupart des ruptures du LCA au handball surviennent chez les adolescents, en particulier les jeunes joueuses entre 14 et 19 ans^(12,13). Dans le cas de jeunes sportifs, la prise en charge chirurgicale est fréquente puisqu'on dénombre plus de 30'000 reconstructions en France chaque année⁽¹⁴⁾. Les conséquences à court terme sont nombreuses et entraînent un arrêt de la pratique sportive de plusieurs mois associé à une diminution de performance de l'ensemble de l'équipe^(15,16). Il existe également des conséquences à plus long terme, comme une diminution de la qualité de vie pendant plus de 20 ans⁽¹⁷⁾ et un risque majoré d'arthrose post traumatique du genou⁽¹⁸⁾. De plus le risque de récurrences est majeur puisqu'il est 15 fois plus élevé que dans la population générale⁽¹⁹⁾. Les données provenant des registres scandinaves indiquent que la plupart des récurrences surviennent dans les deux ans postopératoires, avec un taux de 18% chez les joueurs de moins de 20 ans⁽²⁰⁾ et de 5,2% chez les joueurs de haut niveau⁽²¹⁾. Dans les cinq ans qui suivent la lésion le taux de récurrences peut atteindre 23% chez les jeunes athlètes de moins de 25 ans⁽²²⁾.

Dans la pratique du handball, environ 80% des ruptures du LCA surviennent en phase d'attaque, lorsque le joueur est en possession du ballon et en l'absence de contact direct avec l'adversaire^(7,23). Les deux situations de jeu les plus pourvoyeuses de blessures sont les réceptions de saut et les changements de direction rapides face à un adversaire^(6,23-27). Au handball comme dans d'autres sports tels que le basketball ou le football, le mécanisme lésionnel semble survenir dans les 100 millisecondes qui suivent la pose du pied au sol, lors d'un valgus forcé du genou en légère flexion^(24,28). La lésion du LCA est aujourd'hui considérée comme un mécanisme tridimensionnel⁽²⁹⁻³¹⁾ combinant des contraintes en abduction et rotation médiale du genou associées à une traction antérieure du tibia sous l'action du quadriceps⁽²⁴⁾. Classiquement, certains facteurs de risque intrinsèques de rupture du LCA sont mis en avant comme le sexe^(32,33), les antécédents de

blessures⁽³⁴⁾, l'âge, l'indice de masse corporelle ou encore certains paramètres anatomiques comme la laxité articulaire ou la pente tibiale^(8,35). Ces facteurs de risques intrinsèques de rupture du LCA sont également dépendant de déterminants neuromusculaires et biomécaniques qui à leur tour augmentent les contraintes sur le LCA⁽³⁶⁾ et majorent, in fine, le risque de blessure⁽⁴⁾. Parmi ces déterminants citons les plus classiques, à savoir l'augmentation du valgus et de l'extension de genou couplée à une rotation médiale et une abduction de hanche lors des changements de direction rapides^(4,37,38). Plusieurs travaux ont également révélé qu'un contrôle du tronc provoquant une inclinaison controlatérale à la direction du joueur majore les contraintes en abduction sur le genou⁽³⁸⁻⁴⁰⁾. Enfin, d'autres équipes ont associé le fait qu'un faible recrutement des ischios jambiers par rapport au quadriceps en amont de la pose du pied augmentait le risque de rupture du LCA^(4,41).

S'il est évident que les analyses (réalisées généralement par les staffs médicaux qui encadrent les équipes compétitives et qui, généralement, utilisent des données cinématiques issues d'enregistrements vidéo des situations de jeu) concluent au fait qu'une organisation biomécanique considérée « à risque » est à l'origine du traumatisme, le rôle que le Système Nerveux Central (SNC) peut jouer dans ce domaine ne doit pas être négligé. Il faut souligner que c'est le SNC, et plus particulièrement la façon dont il contrôle/régule le flux incessant des entrées sensorielles et des sorties motrices (i.e. la boucle sensorimotrice), qui finalement induit une biomécanique particulière. Comme pour les articulations de la cheville ou de l'épaule, le contrôle musculaire de l'articulation du genou est sous la dépendance d'un bouclage sensorimoteur aux fonctions particulières.

DÉVELOPPEMENT

Concernant le genou, la littérature assigne au SNC une place prédominante dans la compréhension des facteurs de risque de rupture du LCA^(42,43). Cette lésion résulterait d'un enchaînement d'erreurs sensorimotrices d'origines centrales, aboutissant à une incapacité à maintenir une stabilité articulaire lors de tâches motrices complexes telles que les réceptions de sauts ou les changements de directions rapides^(44,45). Plusieurs travaux soulignent l'existence d'altérations d'intégration sensorimotrice dans le contexte de la blessure⁽⁴⁶⁾. Formellement ces altérations centrales peuvent être réparties en deux grandes catégories. La première concerne l'existence de déficits identifiés en amont de la blessure. Des études prospectives de suivi de cohortes ont identifié des déficits centraux en amont des blessures, confirmant ainsi la place du SNC au cœur des facteurs de risque lésionnels⁽⁴⁷⁻⁴⁹⁾. Par exemple l'équipe de Grooms et coll. montre chez un patient opéré du LCA, grâce à la technique d'imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) l'existence, peu de temps avant une rupture controlatérale, d'une sur activation des zones responsables de la planification motrice, du traitement sensoriel et du contrôle visuo-moteur⁽⁴⁹⁾. L'équipe de Diekfuss a par ailleurs démontré que les joueuses de football qui se rompent le LCA présentaient une diminution des connections entre le cortex sensoriel primaire (S1) gauche impliqué dans le traitement des signaux proprioceptifs et le lobe cérébelleux postérieur droit (Lobule XIIB), impliqué dans l'équilibre et la coordination comparativement à une

population saine^(47,48). La seconde catégorie concerne l'existence d'altérations consécutives à la lésion. La rupture du LCA entraîne une détérioration des propriocepteurs ligamentaires associée à une perte d'une grande partie des signaux afférents provoquant, in fine, une réorganisation globale du système sensorimoteur^(42,50,51). Plusieurs revues systématiques récentes ont confirmé l'existence de modifications de l'activité cérébrale suite à des lésions du LCA^(45,46). Les altérations centrales consécutives à cette blessure peuvent être synthétisées de la sorte :

1. Altération des voies nerveuses motrices (efférences)

- Augmentation des seuils moteurs (TMS);
- Augmentation de l'activité des aires motrices (IRMf);

2. Altérations des voies nerveuses sensorielles (afférences)

- Augmentation des densités de fréquence Thêta dans le cortex frontal et Alpha 2 dans le cortex pariétal (EEG);
- Anomalie dans les potentiels évoqués somatosensoriels (EEG);
- Augmentation d'activité corticale dans les aires visuelles (IRMf);
- Diminution d'activité corticale dans les aires somatosensorielles (IRMf);
- Utilisation moins efficace par le SNC des ressources proprioceptives et attentionnelles (EEG);

3. Altération des fonctions neurocognitives

- Augmentation des temps de réaction, diminution des vitesses de traitement de l'information;
- Altération de la mémoire visuelle et verbale;
- Augmentation des perturbations posturales lors de la réalisation de protocoles de double tâche;
- Augmentation de la demande attentionnelle lors de tâches simples;

LE CONTRÔLE POSTURAL COMME TÉMOIN DES CAPACITÉS D'INTÉGRATION SENSORIMOTRICE

L'ensemble des travaux mettant en avant l'altération des processus d'intégration sensorimotrice dans le contexte de la blessure repose sur l'utilisation d'outils (IRMf, EEG, TMS) coûteux, complexes et peu adaptés à l'analyse de tâches fonctionnelles proches des mécanismes lésionnels. Du fait de son accessibilité, et dans la mesure où le contrôle postural est impliqué dans le risque de lésion du LCA^(35,52), l'évaluation des capacités d'intégration proprioceptive des athlètes lors de tâches posturales via l'utilisation de la vibration tendineuse, apparaît comme une approche pertinente du problème. Formellement le contrôle postural se définit comme l'ensemble des mécanismes nerveux permettant de maintenir la projection de son centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation en position debout sur une surface d'équilibration stable^(53,54). L'équilibre est atteint lorsque la résultante des forces appliquées aux différents segments du corps est nulle, et que la somme des moments de force appliqués au centre de masse est égale à zéro⁽⁵⁵⁾.

Une méta-analyse confirme que les sujets ayant subi une rupture du LCA présentent des déficits de contrôle

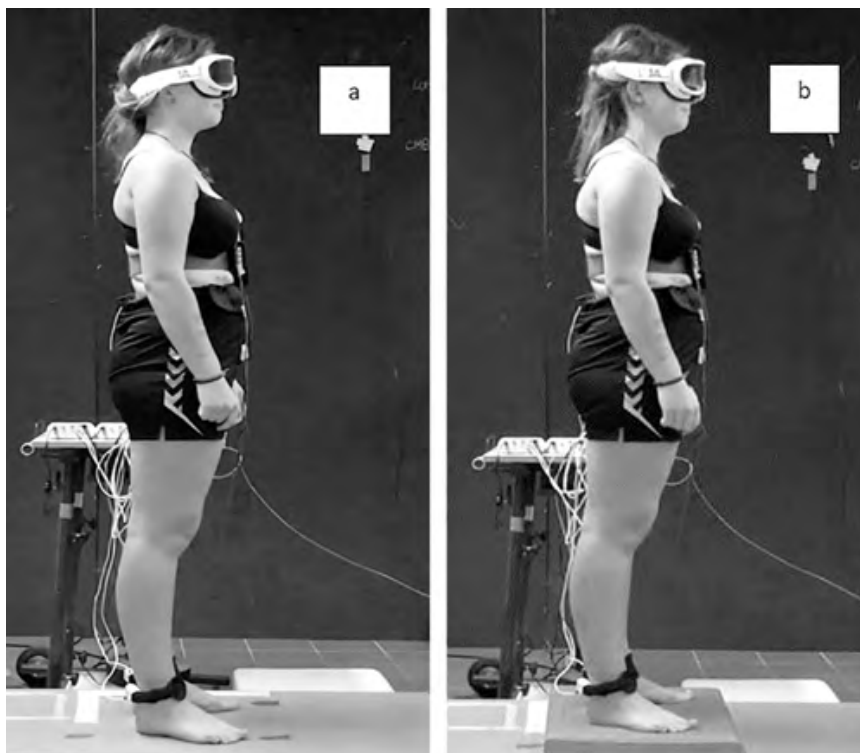
postural en particulier lors de tâches unipodales les yeux ouverts⁽⁵⁶⁾. A plus long terme (i.e. 20 ans après la lésion), les sujets blessés présentent une moins grande adaptabilité de contrôle postural associée à des efforts plus importants de maintien de l'équilibre par rapport à des sujets sains⁽⁵⁷⁾. Ceci conduit à un manque de flexibilité du contrôle moteur dans des situations non anticipées⁽⁵⁸⁾. Ces déficits de contrôle postural semblent principalement liés à des altérations de la pondération sensorielle.

Dynamique par nature, le contrôle postural repose sur la capacité de pouvoir répondre de manière rapide les différentes entrées sensorielles dont dispose l'individu⁽⁵⁹⁻⁶³⁾. Cette repondération peut s'opérer entre différentes modalités sensorielles (les entrées proprioceptives deviennent par exemple prépondérantes en absence de vision) comme au sein d'une même modalité sensorielle telle que la proprioception. Il a été démontré par exemple qu'en absence de vision, l'altération des informations somatosensorielles en provenance de la cheville et du pied suite à un refroidissement induit par le port d'une botte réfrigérée⁽⁶⁰⁾ ou à l'utilisation de supports d'équilibration instables^(1,64,65) conduit le SNC à augmenter le recours aux informations proprioceptives provenant de la hanche pour maintenir l'équilibre. L'application de vibrations sur le muscle et/ou le tendon à une fréquence comprise entre 80 et 100 Hz induit chez les sujets, une illusion de mouvement dans la direction de l'allongement musculaire. Les fibres afférentes *Ia* étant

sensibles aux changements de longueur du muscle, l'activité des FNM est proportionnelle à la vitesse et la « quantité » d'étirement. La vibration qui agit comme un « leurre sensoriel » est fréquemment utilisée pour investiguer l'intégration proprioceptive par le SNC lors de tâches posturales. Ainsi, en station érigée, lorsque la vibration est appliquée sur une zone dont les signaux proprioceptifs sont prépondérants dans le maintien de l'équilibre, les sujets adoptent une correction posturale inconsciente allant dans le sens opposé à l'illusion. Cette réponse est dépendante du muscle vibré ainsi que du poids attribué par le SNC aux informations proprioceptives provenant de cette région anatomique. La vibration des triceps suraux conduit par exemple à un déplacement postérieur du centre des pressions (CoP), alors que la vibration des muscles postérieurs du cou induit un déplacement antérieur du CoP. Plus le SNC utilise les signaux proprioceptifs originaires de la zone vibrée comme support du contrôle postural, plus la déstabilisation engendrée par la vibration de cette région sera importante. Il est donc possible de quantifier de manière fiable l'intégration et l'utilisation des informations proprioceptives par le SNC dans le contrôle postural. La capacité de repondération proprioceptive développée par chaque individu peut s'évaluer en utilisant un protocole qui consiste à apprécier l'effet postural de vibrations appliquées au niveau des tendons des muscles en charge du contrôle des articulations de la cheville (Triceps suraux) et de la hanche (Érecteurs spinaux) (Figure 1).

Figure 1

Illustration de la méthodologie permettant de déterminer l'indice de repondération proprioceptive



L'indice de repondération proprioceptive est un indicateur fiable et fréquemment utilisé pour évaluer le recours aux informations proprioceptives provenant des différentes zones anatomiques. Un score de 1 traduit une utilisation à 100 % des entrées proprioceptives de la cheville, alors qu'un score proche de 0 traduit une utilisation préférentielle de la proprioception lombaire. De plus, lors de tâches d'équilibration sur différentes surfaces en l'absence de vision, le SNC opère une repondération des entrées proprioceptives provenant de différentes zones anatomiques. Par exemple, sur une surface stable comme un sol dur, les sujets utilisent principalement les signaux proprioceptifs émanant de la cheville, alors que le passage sur une surface instable conduit à une repondération en faveur des signaux provenant de la région lombaire^(66,67). Cette flexibilité proprioceptive semble être un atout majeur dans le cadre du contrôle postural car elle permet de minimiser les déplacements du centre de pression dans des environnements variés et donc les risques de déséquilibres ou de blessures^(53,68,69).

DISCUSSION

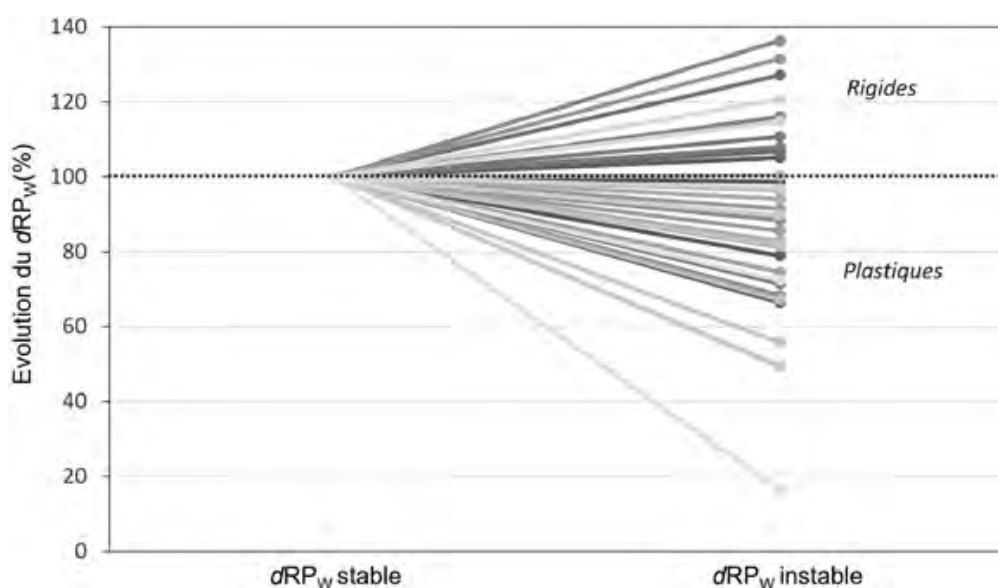
Des capacités variables selon les individus.

Bien que cette plasticité d'origine centrale, que certains qualifient d'*abondance sensorielle*, soit considérée comme une caractéristique des sujets sains^(70,71), une certaine hétérogénéité interindividuelle est observée. A l'instar de ce qui est constaté (et compris intuitivement) pour l'audition ou la vision (la présence dans la société d'individus myopes ou malentendants est une réalité perçue naturellement), il est important de considérer que la capacité à manipuler différentes sources proprioceptives varie selon les individus comme illustré par les quelques exemples suivants. En analysant l'équilibre orthostatique d'un panel d'individus sains, il est possible de constater

que plus les sujets sont équilibrés sur sol stable, moins ils le sont sur sol instable et inversement. Il est ainsi possible de diviser la population générale en deux sous-groupes aux comportements différents⁽⁷²⁾ selon la source sensorielle utilisée pour maintenir son équilibre (proprioceptive vs. gravito-inertielle c'est à dire originaire du système vestibulaire). Une autre observation montre que le comportement de 51 personnes saines soumises à une modification soudaine du support d'équilibre permet de faire le constat que seuls certains individus perçoivent ce changement et modifient leur posture⁽⁷³⁾. Ces résultats, qui appuient l'existence d'une variabilité interindividuelle importante dans l'intégration des signaux proprioceptifs, ont été confirmés par Pavailler et. coll.⁽⁷⁴⁾ qui, une fois encore, montrent, au sein d'une population générale saine, que seule une partie des individus utilisent majoritairement les informations proprioceptives issues de la cheville. Les raisons de l'existence de ces différences comportementales, généralement qualifiées de stratégies (ou préférences) sensorielles, sont encore mal comprises. Un travail récent mené conjointement entre le Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité de l'Université Savoie Mont Blanc et le Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale de l'Université de Bretagne Orientale a permis de mettre en évidence l'existence, au sein d'une population homogène composée de 35 jeunes athlètes sains de haut niveau, d'une large variabilité des stratégies proprioceptives de contrôle postural⁽⁷⁵⁾. L'analyse des signaux posturaux a permis de déterminer l'indice de pondération et de réintégration proprioceptive. Si de manière générale les résultats font état d'une diminution de l'indice de pondération sur sol instable conformément aux données de la littérature, ce travail a permis de démontrer l'existence d'une large variabilité interindividuelle dans l'évolution de cet indice (Figure 2). Plus précisément il est possible de catégoriser deux types de profils en fonction de l'évolution des capacités de plasticité proprioceptive

Figure 2

Illustration de l'évolution (en %) de l'indice de repondération proprioceptive (dRP_w) de l'ensemble de la population testée



D'après (75). Si pour deux tiers des individus cet indice diminue (individus plastiques), il est toutefois possible d'observer pour un tiers d'entre eux (individus rigides) que le recours aux informations proprioceptives originaires de la cheville est augmenté. Voir les explications dans le texte.

associées au changement de surface d'équilibration. La première stratégie (qualifiée de plastique) est exprimée par les deux tiers des individus et se caractérise par une repondération en direction des entrées proprioceptives d'origine lombaire lors du passage sur plan instable. La seconde stratégie (qualifiée de rigide) est exprimée par le dernier tiers des individus et se caractérise par une augmentation du recours aux signaux proprioceptifs originaires de la cheville en condition instable bien que la fiabilité de ces signaux diminue dans ces conditions d'instabilité⁽⁶⁶⁾. Ce comportement rigide traduit pour ces sujets une incapacité à sélectionner les signaux les plus fiables afin d'adapter le comportement en fonction de l'exigence posturale.

Des profils aux origines floues mais aux conséquences potentiellement problématiques

Au-delà du constat il convient de s'interroger sur l'origine du phénomène. Quel est le processus permettant d'expliquer les différences avec lesquelles nous interagissons avec l'environnement? Sans être exclusif, les données récentes de la littérature montrent que les prédispositions individuelles en termes d'acuité, d'intégration proprioceptive et de contrôle postural dépendent majoritairement de l'apprentissage moteur. Il est aujourd'hui admis que la pratique régulière d'une activité sportive tout comme le niveau des pratiques sportives antérieures sont des éléments qui favorisent la fiabilité des signaux proprioceptifs et l'intégration centrale des informations somatosensorielles^(2,76-78). La question qui découle de l'existence de profils sensoriels au sein d'une population générale est celle relative à leurs potentielles répercussions tant sur les risques traumatiques que sur les capacités de réhabilitation. La « plasticité proprioceptive » traduit la capacité du SNC à repondérer les signaux afférents et reflète son adaptabilité face aux changements

de conditions d'équilibration. Son absence a comme conséquence l'émergence de stratégie de contrôle mono-articulaire rigide pouvant conduire à la survenue de pathologies ou de traumatismes⁽⁷⁹⁾. Une stratégie posturale inadaptée basée sur des informations moins fiables génère une commande motrice sous-optimale pouvant compromettre la stabilité articulaire lors de la réalisation de tâches complexes et majore certains déterminants biomécaniques impliqués dans le risque de rupture du LCA^(4,36).

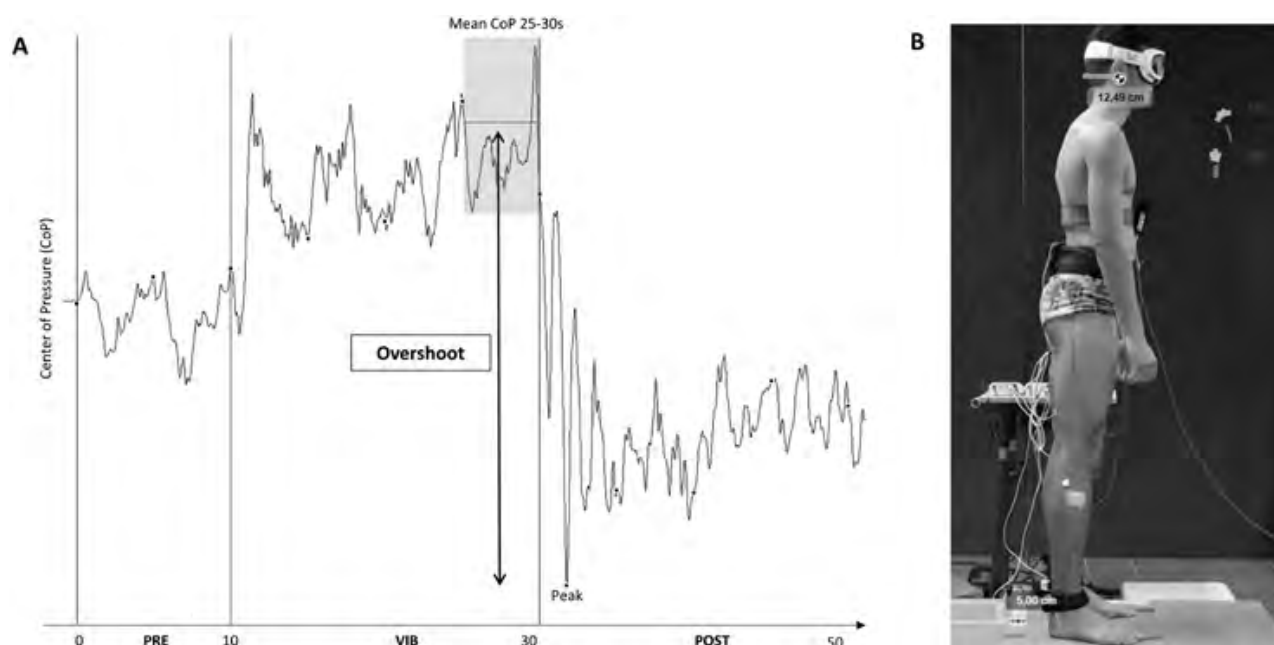
Mesurer les profils sensoriels

Après avoir souligné l'importance du profil proprioceptif sur les risques d'atteinte du ligament croisé antérieur, il convient de s'interroger sur les moyens qui permettent aux professionnels de santé d'identifier les stratégies neuromotrices individuelles pour finalement améliorer la prise en charge et la prévention des blessures. A de rares exceptions près, les spécialistes de la rééducation ne peuvent reproduire en cabinet les protocoles d'analyse réalisés en laboratoire qui reposent généralement sur des outils complexes. Ils doivent au contraire pouvoir accéder à ces informations grâce à des tests fonctionnels simples et reproductibles. En ce qui concerne les profils proprioceptifs, l'utilisation de smartphones permet d'évaluer avec une excellente fiabilité les capacités individuelles de repondération sensorielle. Le récent travail de Picot et coll.⁽⁸⁰⁾ indique que l'analyse vidéo en deux dimensions permet d'évaluer les capacités individuelles de repondération proprioceptive des sujets de manière fiable et reproductible (Figure 3).

Ainsi, l'utilisation d'outils simples et facilement accessibles permet d'identifier les stratégies proprioceptives des individus dans la pratique courante sans avoir recours à des outils de laboratoire.

Figure 3

A) Paramètres posturaux (déplacement sagittal du CoP) utilisés dans l'évaluation de la réintégration proprioceptive dans le cadre d'une analyse de laboratoire réalisée avec une plateforme de force B)



D'après (80), enregistrement vidéo du déplacement antérieur du lobe de l'oreille pour le calcul de l'Overshoot lors de l'arrêt de la vibration à l'aide du logiciel libre Kinovea.

L'absence de plasticité proprioceptive traduit une incapacité à augmenter le recours aux signaux proprioceptifs lombaires lors d'une tâche d'équilibration sur plan instable. En d'autres termes, le SNC augmente le recours aux afférences provenant de la cheville en dépit du fait qu'il s'agisse d'informations peu fiables dans ces conditions. Cette absence de plasticité proprioceptive entraîne un comportement moteur associé à une augmentation du risque pour le LCA. L'existence de profils proprioceptifs rigides et plastiques soulève donc la question de la possibilité de modifier ou corriger les stratégies posturales par des méthodes d'entraînement ou de rééducation. Même si la raison de cette absence de plasticité reste inconnue, il est néanmoins pertinent d'entraîner le SNC à utiliser les signaux proprioceptifs lombaires sur sol instable afin de faire évoluer les sujets vers un profil plus plastique. Parmi les différentes pistes envisagées, la plus plausible reste la thérapie par contraintes. En effet, l'analyse des mécanismes de repondération sensorielle montre qu'une diminution de la fiabilité voire l'indisponibilité d'une source informationnelle contraint le SNC à utiliser celles encore disponibles pour maintenir l'équilibre postural^(81,82). Par exemple, la perturbation des informations visuelles via l'utilisation de lunettes stroboscopiques oblige le SNC à opérer une repondération au profit des informations proprioceptives^(83,84). Dans la même optique, la perturbation des signaux en provenance de la cheville lors de tâches posturales en l'absence de vision contraindrait le SNC à utiliser les afférences lombaires pour maintenir l'équilibre. L'utilisation répétée de la vibration tendineuse comme perturbateur proprioceptif de la cheville pourrait également conduire le SNC à opérer cette repondération.

CONCLUSION

Bien que tous les individus soient dotés de caractéristiques biomécaniques et neuromusculaires similaires, la singularité de chacun impose, dans un ensemble de domaines (éducation, entraînement sportif...), le principe d'individualisation. La kinésithérapie n'échappe pas à ce constat. Les bilans diagnostiques réalisés par les professionnels tiennent compte du profil et des objectifs du patient, de son environnement, finalement d'un ensemble de paramètres qui permet de

construire un programme rééducatif adapté offrant une prise en charge individualisée. Certains paramètres d'individualisation sont directement accessibles comme le genre, l'âge, la présence de pathologies particulières (diabète, obésité, douleurs chroniques...) et sont systématiquement intégrés lors de la prise en charge. D'autres paramètres peuvent être inclus dans cette démarche comme les capacités de production de force, de mobilité articulaire (laxité) au moyen de dispositifs de mesure. Les données récentes de la littérature qui ont mis en évidence l'existence d'une variabilité importante dans la stratégie posturale des individus selon leur capacité de plasticité proprioceptive montrent qu'il est nécessaire de pouvoir qualifier les patients selon ce critère. Cette individualisation permettrait de maximiser la prise en charge des patients afin d'obtenir une efficacité optimale dans la prévention et la rééducation des blessures. De futures recherches sont toutefois nécessaires afin de mieux comprendre l'implication concrète de cette variabilité interindividuelle sur le risque de blessures. De même, l'évolution des stratégies proprioceptives en réponse à la survenue de fatigue et à la suite à d'exercices posturaux permettra d'apprécier l'évolution de ces comportements au cours du temps.

IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE

- Il existe une variabilité interindividuelle importante dans les capacités de repondération proprioceptive.
- Les individus qui présentent une rigidité proprioceptive présenteraient un contrôle postural sous-optimal.
- L'absence de plasticité proprioceptive pourrait jouer un rôle dans le risque de blessures au membre inférieur telle que la lésion du ligament croisé antérieur.
- Il est important pour les praticiens de connaître l'existence de cette variabilité et d'en comprendre les conséquences dans le cadre des programmes de prévention et ou de rééducation.

Contact

Brice Picot – brice.picot@univ-smb.fr

ABSTRACT

Introduction: Although proprioception is used in the field of clinical practice, some ambiguities remain regarding the methods and exercises implemented. While protocols for measuring proprioceptive acuity are known, those related to proprioceptive integration capabilities are less so. Theoretical and applicative elements need to be further explored.

Objective: This article aims to present the origin of differences in the field of proprioceptive integration and its links to knee trauma. The article outlines the approaches that practitioners can take to improve the management and prevention of injuries.

Development: The existence of changes in brain activity following anterior cruciate ligament (ACL) lesions, which are associated with deficits in postural control, can be linked to

alterations in sensory weighting. Two distinct profiles can be identified based on the evolution of proprioceptive plasticity capacities under different balancing conditions. The first profile is characterized by a reweighting towards proprioceptive inputs of lumbar origin, while the second profile is characterized by an increase in the use of proprioceptive signals originating from the ankle. Although the reliability of these signals decreases under conditions of instability, this lack of proprioceptive plasticity could contribute to the risk of lower limb injuries, such as ACL injury.

Conclusion: The existence of significant variability in postural strategies justifies the need to classify patients according to this criterion in order to achieve optimal effectiveness in the prevention and rehabilitation of injuries.

KEYWORDS

proprioception / sensory reintegration / joint control / tendon vibration

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung: Obwohl die Propriozeption im Bereich der klinischen Praxis eingesetzt wird, bleiben Unklarheiten bezüglich der Methoden und der eingesetzten Anwendungen bestehen. Während Verfahren zur Messung der propriozeptiven Schärfe bekannt sind, trifft dies weniger auf die Verfahren zur Messung der propriozeptiven Integrationsfähigkeit zu. Hierzu bedarf es weiterer Untersuchungen theoretischer und geeigneter Komponenten.

Ziele: In diesem Artikel soll der Ursprung der Unterschiede im Bereich der propriozeptiven Integration und deren Zusammenhang mit Knieverletzungen dargestellt werden. Es sollen Ansätze aufgezeigt werden, die von Praktizierenden zur Verbesserung der Behandlung und Prävention von Verletzungen eingesetzt werden können.

Entwicklung: Das Vorhandensein von Veränderungen der Gehirnaktivität infolge von Verletzungen des vorderen Kreuzbandes (ACL), die mit Defiziten der Haltungssteuerung verbunden sind, steht in Zusammenhang mit Veränderungen

der sensorischen Gewichtung. Je nachdem, wie sich die propriozeptiven Plastizitätsfähigkeiten unter verschiedenen Gleichgewichtsbedingungen entwickeln, lassen sich zwei Arten von Profilen kategorisieren. Das erste Profil ist durch eine Neugewichtung in Richtung der propriozeptiven Inputs aus dem Lendenwirbelbereich gekennzeichnet, während sich das zweite Profil durch einen verstärkten Rückgriff auf propriozeptive Signale aus dem Sprunggelenk auszeichnet. Obwohl die Zuverlässigkeit dieser Signale unter instabilen Bedingungen abnimmt, könnte dieser Mangel an propriozeptiver Plastizität zum Risiko von Verletzungen der unteren Extremitäten, wie der Verletzung des ACL, beitragen.

Schlussfolgerung: Die Existenz einer signifikanten Variabilität der posturalen Strategien rechtfertigt die Notwendigkeit, dass die Patienten nach diesem Kriterium kategorisiert werden, um eine optimale Wirksamkeit der Prävention und Rehabilitation von Verletzungen zu erzielen.

SCHLÜSSELWÖRTER

Propriozeption / sensorische Neugewichtung / Gelenkkontrolle / Sehnenvibration

Références

1. Forestier N, Terrier R, Teasdale N. Ankle muscular proprioceptive signals' relevance for balance control on various support surfaces: an exploratory study. *Am J Phys Med Rehabil.* janv 2015;94(1):20-7.
2. Han J, Anson J, Waddington G, Adams R, Liu Y. The Role of Ankle Proprioception for Balance Control in relation to Sports Performance and Injury. *BioMed Res Int [Internet].* 2015 [cité 21 août 2019];2015. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4637080/>
3. Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: A critical review of methods. *J Sport Health Sci.* 2016;5(1):80-90.
4. Zebis MK, Aagaard P, Andersen LL, Hölmich P, Clausen MB, Brandt M, et al. First-time anterior cruciate ligament injury in adolescent female elite athletes: a prospective cohort study to identify modifiable risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc [Internet].* 7 mai 2021 [cité 10 mai 2021]; Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1007/s00167-021-06595-8>
5. Myklebust G, Skjøberg A, Bahr R. ACL injury incidence in female handball 10 years after the Norwegian ACL prevention study: important lessons learned. *Br J Sports Med.* 2013;47(8):476-9.
6. Laver L, Landreau P, Seil R, Popovic N, éditeurs. *Handball Sports Medicine [Internet].* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018 [cité 4 juill 2018]. Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-55892-8>
7. Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, Skjøberg A, Olsen OE, Bahr R. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: a prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med.* 2003;13(2):71-8.
8. Seil R, Senorski EH, Landreau P, Engebretsen L, Menetrey J, Samuelsson K. Management of ACL Injuries in Handball. In: Laver L, Landreau P, Seil R, Popovic N, éditeurs. *Handball Sports Medicine: Basic Science, Injury Management and Return to Sport [Internet].* Berlin, Heidelberg: Springer; 2018 [cité 17 août 2022]. p. 279-94. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-662-55892-8_20
9. Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *The Knee.* 2006;13(3):184-8.
10. Laver L, Myklebust G. Handball Injuries: Epidemiology and Injury Characterization. In: Doral MN, Karlsson J, éditeurs. *Sports Injuries: Prevention, Diagnosis, Treatment and Rehabilitation [Internet].* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015 [cité 28 févr 2019]. p. 2781-805. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36569-0_287
11. Prodromos CC, Han Y, Rogowski J, Joyce B, Shi K. A meta-analysis of the incidence of anterior cruciate ligament tears as a function of gender, sport, and a knee injury-reduction regimen. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc.* 2007;23(12):1320-1325.e6.
12. Sanders TL, Kremers HM, Bryan AJ, Larson DR, Dahm DL, Levy BA, et al. Incidence of Anterior Cruciate Ligament Tears and Reconstruction: A 21-Year Population-Based Study. *Am J Sports Med [Internet].* 26 févr 2016 [cité 30 juin 2020]; Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0363546516629944>
13. Lind M, Menhert F, Pedersen AB. The first results from the Danish ACL reconstruction registry: epidemiologic and 2 year follow-up results from 5,818 knee ligament reconstructions. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(2):117-24.
14. Beaufils P, Hulet C, Dhénain M, Nizard R, Nourissat G, Pujol N. Clinical practice guidelines for the management of meniscal lesions and isolated lesions of the anterior cruciate ligament of the knee in adults. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR.* 2009;95(6):437-42.
15. Kaux JF, Roberjot M, Delvaux F, Lehance C, Croisier JL, Pennelle T, et al. Traumatologie des sports olympiques de ballon en salle. Partie 2: le Handball. *J Traumatol Sport.* 2017;34(3):172-6.
16. Pappas E, Shiyko MP, Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Biomechanical Deficit Profiles Associated with ACL Injury Risk in Female Athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2016;48(1):107-13.
17. Filbay SR, Culvenor AG, Ackerman IN, Russell TG, Crossley KM. Quality of life in anterior cruciate ligament-deficient individuals: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2015;49(16):1033-41.
18. Lie MM, Risberg MA, Storheim K, Engebretsen L, Øiestad BE. What's the rate of knee osteoarthritis 10 years after anterior cruciate ligament injury? An updated systematic review. *Br J Sports Med.* 2019;53(18):1162-7.
19. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of contralateral and ipsilateral anterior cruciate ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med.* 2012;22(2):116-21.
20. Webster KE, Feller JA. Exploring the High Re-injury Rate in Younger Patients Undergoing Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2016;44(11):2827-32.
21. Lai CCH, Ardern CL, Feller JA, Webster KE. Eighty-three per cent of elite athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br J Sports Med.* 2018;52(2):128-38.

22. Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD. Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2016;44(7):1861-76.
23. Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Bahr R. Injury Mechanisms for Anterior Cruciate Ligament Injuries in Team Handball: A Systematic Video Analysis. *Am J Sports Med.* 2004;32(4):1002-12.
24. Koga H, Nakamae A, Shima Y, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: Knee Joint Kinematics in 10 Injury Situations From Female Team Handball and Basketball. *Am J Sports Med.* 2010;38(11):2218-25.
25. Myklebust G, Mæhlum S, Holm I, Bahr R. A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. *Scand J Med Sci Sports.* 1998;8(3):149-53.
26. Strand T, Tvedte R, Engebretsen L, Tegnander A. Anterior cruciate ligament injuries in handball playing. Mechanisms and incidence of injuries. *Tidsskr Den Nor Laegeforening Tidsskr Prakt Med Ny Raekke.* 1990;110(17):2222-5.
27. Zebis MK, Bencke J. Biomechanical Aspects in Handball: Lower Limb. In: Laver L, Landreau P, Seil R, Popovic N, éditeurs. *Handball Sports Medicine: Basic Science, Injury Management and Return to Sport* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018 [cité 26 mars 2019]. p. 61-8. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-662-55892-8_5
28. Koga H, Nakamae A, Shima Y, Bahr R, Krosshaug T. Hip and Ankle Kinematics in Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury Situations: Video Analysis Using Model-Based Image Matching. *Am J Sports Med* [Internet]. 12 oct 2017 [cité 4 févr 2020]; Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0363546517732750>
29. Kiapour AM, Demetropoulos CK, Kiapour A, Quatman CE, Wordeman SC, Goel VK, et al. Strain Response of the Anterior Cruciate Ligament to Uniplanar and Multiplanar Loads During Simulated Landings: Implications for Injury Mechanism. *Am J Sports Med.* 2016;44(8):2087-96.
30. Quatman CE, Kiapour AM, Demetropoulos CK, Kiapour A, Wordeman SC, Levine JW, et al. Preferential Loading of the ACL Compared With the MCL During Landing: A Novel In Sim Approach Yields the Multiplanar Mechanism of Dynamic Valgus During ACL Injuries. *Am J Sports Med.* 2014;42(1):177-86.
31. Quatman CE, Quatman-Yates CC, Hewett TE. A 'Plane' Explanation of Anterior Cruciate Ligament Injury Mechanisms. *Sports Med.* 2010;40(9):729-46.
32. Laver L, Luig P, Achenbach L, Myklebust G, Karlsson J. Handball Injuries: Epidemiology and Injury Characterization: Part 1. In: Laver L, Landreau P, Seil R, Popovic N, éditeurs. *Handball Sports Medicine: Basic Science, Injury Management and Return to Sport* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018 [cité 6 avr 2021]. p. 141-53. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-662-55892-8_11
33. Myklebust G, Maehlum S, Engebretsen L, Strand T, Solheim E. Registration of cruciate ligament injuries in Norwegian top level team handball. A prospective study covering two seasons. *Scand J Med Sci Sports.* 1997;7(5):289-92.
34. Rafnsson ET, Valdimarsson Ö, Sveinsson T, Árnason Á. Injury Pattern in Icelandic Elite Male Handball Players. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med.* 2019;29(3):232-7.
35. Collings TJ, Bourne MN, Barrett RS, du Moulin W, Hickey JT, Diamond LE. Risk Factors for Lower Limb Injury in Female Team Field and Court Sports: A Systematic Review, Meta-analysis, and Best Evidence Synthesis. *Sports Med* [Internet]. 5 janv 2021 [cité 1 févr 2021]; Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01410-9>
36. Donelon TA, Dos'Santos T, Pitchers G, Brown M, Jones PA. Biomechanical Determinants of Knee Joint Loads Associated with Increased Anterior Cruciate Ligament Loading During Cutting: A Systematic Review and Technical Framework. *Sports Med- Open.* déc 2020;6(1):53.
37. Bencke J, Curtis D, Krogshede C, Jensen LK, Bandholm T, Zebis MK. Biomechanical evaluation of the side-cutting manoeuvre associated with ACL injury in young female handball players. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(8):1876-81.
38. Kristianslund E, Faul O, Bahr R, Myklebust G, Krosshaug T. Sidestep cutting technique and knee abduction loading: implications for ACL prevention exercises. *Br J Sports Med.* 2014;48(9):779-83.
39. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: a prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med.* 2007;35(7):1123-30.
40. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. The effects of core proprioception on knee injury: a prospective biomechanical-epidemiological study. *Am J Sports Med.* 2007;35(3):368-73.
41. Zebis MK, Andersen LL, Bencke J, Kjaer M, Aagaard P. Identification of athletes at future risk of anterior cruciate ligament ruptures by neuromuscular screening. *Am J Sports Med.* 2009;37(10):1967-73.
42. Needle AR, Lepley AS, Grooms DR. Central Nervous System Adaptation After Ligamentous Injury: a Summary of Theories, Evidence, and Clinical Interpretation. *Sports Med Auckl NZ.* 2017;47(7):1271-88.
43. Shultz SJ, Schmitz RJ, Cameron KL, Ford KR, Grooms DR, Lepley LK, et al. Anterior Cruciate Ligament Research Retreat VIII Summary Statement: An Update on Injury Risk Identification and Prevention Across the Anterior Cruciate Ligament Injury Continuum, 2019, Greensboro, NC. *J Athl Train.* 28 août 2019;54(9):970-84.
44. Gokeler A, Neuhaus D, Benjaminse A, Grooms DR, Baumeister J. Principles of Motor Learning to Support Neuroplasticity After ACL Injury: Implications for Optimizing Performance and Reducing Risk of Second ACL Injury. *Sports Med Auckl NZ.* 2019;49(6):853-65.
45. Piskin D, Benjaminse A, Dimitrakis P, Gokeler A. Neurocognitive and Neurophysiological Functions Related to ACL Injury: A Framework for Neurocognitive Approaches in Rehabilitation and Return-to-Sports Tests. *Sports Health.* 2021;19417381211029264.
46. Neto T, Sayer T, Theisen D, Mierau A. Functional Brain Plasticity Associated with ACL Injury: A Scoping Review of Current Evidence. *Neural Plast* [Internet]. 27 déc 2019 [cité 4 févr 2020];2019. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6948303/>
47. Diekfuss JA, Grooms DR, Nissen KS, Schneider DK, Foss KDB, Thomas S, et al. Alterations in knee sensorimotor brain functional connectivity contributes to ACL injury in male high-school football players: a prospective neuroimaging analysis. *Braz J Phys Ther.* 2020;24(5):415-423.
48. Diekfuss JA, Grooms DR, Yuan W, Dudley J, Barber Foss KD, Thomas S, et al. Does brain functional connectivity contribute to musculoskeletal injury? A preliminary prospective analysis of a neural biomarker of ACL injury risk. *J Sci Med Sport.* 2019;22(2):169-74.
49. Grooms, Page SJ, Onate JA. Brain Activation for Knee Movement Measured Days Before Second Anterior Cruciate Ligament Injury: Neuroimaging in Musculoskeletal Medicine. *J Athl Train.* 2015;50(10):1005-10.
50. Bonnette S, Diekfuss JA, Grooms DR, Kiefer AW, Riley MA, Riehm C, et al. Electrocortical dynamics differentiate athletes exhibiting low- and high- ACL injury risk biomechanics. *Psychophysiology.* 2020;57(4):e13530.
51. 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):303-7.
52. Oshima T, Nakase J, Kitaoka K, Shima Y, Numata H, Takata Y, et al. Poor static balance is a risk factor for non-contact anterior cruciate ligament injury. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2018;138(12):1713-8.
53. Peterka RJ. Chapter 2 - Sensory integration for human balance control. In: Day BL, Lord SR, éditeurs. *Handbook of Clinical Neurology* [Internet]. Elsevier; 2018 [cité 20 mars 2019]. p. 27-42. (Balance, Gait, and Falls; vol. 159). Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444639165000021>
54. Riemann B, A. Caggiano N, M. Lephart S. Examination of a Clinical method of Assessing Postural Control during a Functional Performance Task. *J Sport Rehabil.* 1999;8:171-83.
55. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor Control: Theory and Practical Applications.* Williams & Wilkins; 1995. 496 p.
56. Lehmann T, Paschen L, Baumeister J. Single-Leg Assessment of Postural Stability After Anterior Cruciate Ligament Injury: a Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med - Open.* 2017;3:32.
57. Stensdotter AK, Tengman E, Häger C. Altered postural control strategies in quiet standing more than 20 years after rupture of the anterior cruciate ligament. *Gait Posture.* 2016;46:98-103.
58. Latash ML. The bliss (not the problem) of motor abundance (not redundancy). *Exp Brain Res.* 2012;217(1):1-5.
59. Bronstein AM. Suppression of visually evoked postural responses. *Exp Brain Res.* 1986;63(3):655-8.

60. Glasser S, Collings R, Paton J, Marsden J. Effect of experimentally reduced distal sensation on postural response to hip abductor/ankle evector muscle vibration. *Gait Posture*. 2015;42(2):193-8.
61. Horak FB, Macpherson JM. Postural Orientation and Equilibrium. In: *Comprehensive Physiology* [Internet]. American Cancer Society; 2011 [cité 20 mars 2019]. p. 255-92. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cphy.cp120107>
62. Oie KS, Kiemel T, Jeka JJ. Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2002;14(1):164-76.
63. Peterka RJ, Loughlin PJ. Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol*. 2004;91(1):410-23.
64. Brumagne S, Janssens L, Knapen S, Claeys K, Suuden-Johanson E. Persons with recurrent low back pain exhibit a rigid postural control strategy. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. 2008;17(9):1177-84.
65. Kiers H, Brumagne S, van Dieën J, van der Wees P, Vanhees L. Ankle proprioception is not targeted by exercises on an unstable surface. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(4):1577-85.
66. Ivanenko YP, Solopova IA, Levik YS. The direction of postural instability affects postural reactions to ankle muscle vibration in humans. *Neurosci Lett*. 2000;292(2):103-6.
67. Ivanenko YP, Talis VL, Kazennikov OV. Support stability influences postural responses to muscle vibration in humans. *Eur J Neurosci*. 1999;11(2):647-54.
68. Brumagne S, Cordo P, Verschueren S. Proprioceptive weighting changes in persons with low back pain and elderly persons during upright standing. *Neurosci Lett*. 2004;366(1):63-6.
69. Claeys K, Brumagne S, Dankaerts W, Kiers H, Janssens L. Decreased variability in postural control strategies in young people with non-specific low back pain is associated with altered proprioceptive reweighting. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111(1):115-23.
70. Assländer L, Peterka RJ. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *J Neurophysiol*. 2014;111(9):1852-64.
71. Latash M. There Is No Motor Redundancy in Human Movements. *There Is Motor Abundance*. *Motor Control*. 2000;4(3):259-61.
72. Isableu B, Vuillerme N. Differential integration of kinaesthetic signals to postural control. *Exp Brain Res*. 2006;174(4):763-8.
73. Kluzik J, Horak FB, Peterka RJ. Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface. *Exp Brain Res*. 2005;162(4):474-89.
74. Pavailler S, Hintzy F, Horvais N, Forestier N. Cutaneous stimulation at the ankle: a differential effect on proprioceptive postural control according to the participants' preferred sensory strategy. *J Foot Ankle Res*. 2016;9:9.
75. Picot B, Rémy-Neris O, Forestier N. Proprioceptive postural control strategies differ among non-injured athletes. *Neurosci Lett*. 2022;136366.
76. Han J, Waddington G, Anson J, Adams R. Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability. *J Sci Med Sport*. 2015;18(1):77-81.
77. Paillard T. Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience. *Neurosci Biobehav Rev*. 2017;72:129-52.
78. Paillard T, Zéronian S, Noé F. The optimal exploitation of sensory electrical stimulation for regulating postural balance depends on participants' intrinsic balance abilities. *J Clin Neurosci*. 2021;93:88-91.
79. Brumagne S, Janssens L, Claeys K, Pijnenburg M. Altered variability in proprioceptive postural strategy in people with recurrent low back pain. *Spinal Control Rehabil Back Pain State Art Sci*. 2013;135-44.
80. Picot B, Dury J, Néron G, Samozino P, Terrier R, Rémy-Neris O, et al. Validity and reliability of video analysis to evaluate ankle proprioceptive reintegration during postural control. *Gait Posture*. 2022;91:155-60.
81. Assländer L, Peterka RJ. Sensory reweighting dynamics following removal and addition of visual and proprioceptive cues. *J Neurophysiol*. 2016;116(2):272-85.
82. Peterka RJ. Sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol*. 2002;88(3):1097-118.
83. Kim, Kim JS, Grooms DR. Stroboscopic Vision to Induce Sensory Reweighting During Postural Control. *J Sport Rehabil* [Internet]. 1 sept 2017 [cité 12 avr 2022];26(5). Disponible sur: <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jsr/26/5/article-jsr.2017-0035.xml.xml>
84. Kim KM, Kim JS, Oh J, Grooms DR. Stroboscopic Vision as a Dynamic Sensory Reweighting Alternative to the Sensory Organization Test. *J Sport Rehabil*. 2020;30(1):166-72.

**VOUS AMBITIONNEZ DE DIFFUSER VOS TRAVAUX SCIENTIFIQUES EN RELATION
AVEC LA PHYSIOTHÉRAPIE, L'OSTÉOPATHIE, LES THÉRAPIES MANUELLES
DANS LE MONDE FRANCOPHONE ? ALORS SOUMETTEZ UN ARTICLE À**



**Votre article sera révisé par un comité de lecture qui procèdera à un processus de revue
équitable, indépendant, en double aveugle, suivant les recommandations internationales,
et qui garantit aux lecteurs la pertinence clinique de votre travail.**

Consultez attentivement nos recommandations aux auteurs sur :

<https://www.mainslibres.ch/mains-libres#tab=tab-authorsinfo>