



Institut Régional de Formation aux Métiers de la Rééducation et Réadaptation
Pays de la Loire.

54, rue de la Baugerie – 44230 SAINT-SEBASTIEN SUR LOIRE

**Lésion du ligament croisé antérieur : soutenir l'apprentissage
moteur et la neuroplasticité en rééducation.**

Revue systématique de littérature

Suzon BOISSEAU

Mémoire UE28

Semestre 10

Année scolaire : 2022 - 2023

REGION DES PAYS DE LA LOIRE



AVERTISSEMENT

Les mémoires des étudiants de l'Institut Régional de Formation aux Métiers de la Rééducation et de la Réadaptation sont réalisés au cours de la dernière année de formation MK.

Ils réclament une lecture critique. Les opinions exprimées n'engagent que les auteurs. Ces travaux ne peuvent faire l'objet d'une publication, en tout ou partie, sans l'accord des auteurs et de l'IFM3R.

Engagement de non plagiat

Je, soussignée

Suzon BOISSEAU, déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Fait à Nantes,

Le 18/04/2023

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke extending to the left.

Introduction : Optimiser l'apprentissage moteur est un objectif rééducatif majeur après une lésion du LCA. De nombreux déficits moteurs, biomécaniques mais aussi sensoriels et, plus récemment mis en évidence, centraux persistent suite à cette blessure. La mise en place de certaines techniques lors de la rééducation peut permettre de lutter contre ces altérations. C'est notamment le cas de la focalisation attentionnelle externe, ayant montré ses preuves pour soutenir l'apprentissage moteur. L'objectif de cette étude est de déterminer si l'utilisation de la focalisation attentionnelle externe en rééducation de rupture de LCA est efficace pour améliorer le contrôle postural et le comportement biomécanique des patients

Méthode : Une revue systématique de la littérature a été réalisée en se basant sur le protocole PRISMA. Les recherches ont été effectuées dans les bases de données PubMed (n=32), Science Direct (n=63) et PEDro (n=15). 3 articles ont été retenus pour l'analyse.

Résultats : Peu d'études concluent de l'efficacité de la focalisation attentionnelle externe sur le contrôle postural. Cependant, elle a un impact significatif sur les comportements biomécaniques.

Discussion : La revue réalisée et les articles inclus ont des niveaux de preuves discutables. Des techniques existent pour favoriser l'apprentissage moteur, mais sont peu utilisées en rééducation. Toutefois des recherches sur les processus neurophysiologiques sous-jacents sont nécessaires pour comprendre leurs rôles dans la modulation de la neuroplasticité post lésionnelle.

Mots-clés :

Lésion du ligament croisé antérieur

Focalisation attentionnelle externe

Contrôle postural

Apprentissage moteur

Neuroplasticité

Abstract

Introduction: Optimizing motor learning is a major rehabilitation objective after an ACL injury. Many motor, biomechanical, sensory and, more recently, central deficits persist after this injury. The implementation of certain techniques during rehabilitation can help to combat these alterations. This is notably the case of external attentional focus, which has been shown to support motor learning. The objective of this study is to determine whether the use of external attentional focus in ACL rupture rehabilitation is effective in improving the postural control and biomechanical behaviour of patients.

Method: A systematic review of the literature was performed based on the PRISMA protocol. Searches were performed in the PubMed (n=32), Science Direct (n=63), and PEDro (n=15) databases. 3 articles were selected for analysis.

Results: Few studies conclude that external attentional focus is effective in postural control. However, it has a significant impact on biomechanical behaviours.

Discussion: The review conducted and the articles included have questionable levels of evidence. Techniques exist to promote motor learning, but are not widely used in rehabilitation. However, research on the underlying neurophysiological processes is needed to understand their role in modulating post-injury neuroplasticity.

Keys words

ACL injury

External focus of attention

Postural control

Motor Learning

Neuroplasticity

Index des abréviations

ACL_R = *anterior cruciate ligament reconstruction* = reconstruction du ligament croisé antérieur.

AVC = accident vasculaire cérébral.

CCT = *continous cognitive task* = tâche cognitive continue.

COP = *center of pressure* = centre de pression.

ECR = essai contrôlé randomisé.

EEG = électroencéphalogramme.

ENM = entraînement neuromusculaire.

FAE = focalisation attentionnelle externe.

FAI = focalisation intentionnelle interne.

FNM = fuseaux neuromusculaires.

HAS = Haute Autorité de Santé.

IRM_f = Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

LCA = ligament croisé antérieur.

RS = revue systématique de littérature.

SJR = Scimago Journal Rank.

SNC = système nerveux central.

TMS = *transcranial magnetic stimulation* = stimulation magnétique transcrânienne.

vGRF = *vertical ground reaction force* = force de réaction verticale au sol.

Sommaire

1	Introduction.....	1
2	Cadre théorique	2
2.1	Lésion du LCA, données épidémiologiques	2
2.2	Physiopathologie, mécanismes lésionnels dans les sports de pivot	3
2.3	Facteurs de risque de lésion dans les sports de pivot.....	4
2.4	Ligament croisé antéro-externe (LCA-E)	7
2.5	Rupture du LCA et système nerveux central, quels liens existent-ils ?.....	10
2.6	Neuroplasticité lésionnelle et apprentissage moteur	14
3	Question de recherche.....	17
4	Matériel et méthode	18
4.1	Choix de la méthode.....	18
4.2	Critères PICO.....	18
4.3	Bases de données interrogées.....	19
4.4	Mots clés Equations de recherche	19
4.5	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	20
4.6	Sélection des articles	21
5	Résultats.....	22
5.1	Évaluation méthodologique	23
5.2	Caractéristiques générales des articles	24
5.3	Résultats des études.....	28
6	Discussion.....	32
6.1	Limites et biais méthodologiques.....	32
6.2	Analyse et interprétation des résultats.....	37
6.3	La FAE, un outil parmi d'autres pour soutenir la neuroplasticité post-lésionnelle et optimiser l'apprentissage moteur en rééducation	38
6.4	Des résultats intéressants en rééducation neurologique	43
6.5	La chirurgie reconstructrice du LCA : un traumatisme supplémentaire ?	44
6.6	Réponse à la question de recherche et aux hypothèses.....	45
6.7	Perspectives professionnelles	45
7	Conclusion	46
	Références bibliographiques.....	
	Annexes I à IV	I - IV

Cet écrit utilise la norme Vancouver

1 Introduction

En cabinet libéral ou en centre de rééducation, la prise en charge de patients ayant subi une rupture du ligament croisé antérieur (LCA) du genou est courante. Les dernières études épidémiologiques recensent près de 46 000 chirurgies en France en 2019, pour un nombre de blessures qui reste difficile à estimer (1). Rencontrée majoritairement dans la pratique sportive, cette lésion engendre de multiples répercussions à plus ou moins long terme pour les athlètes (2). Limitation dans les activités de la vie quotidienne, dans le retour à l'activité sportive, risque de récurrence accru mais aussi augmentation du risque de développer de l'arthrose précoce, sont autant de conséquences qu'il faut considérer suite à une rupture du LCA (3,4). Malgré la reconstruction chirurgicale, seul 65% des sportifs retrouvent leur niveau d'avant blessure et seulement 55% reprennent la compétition (4).

Bien que les patients suivent dans la majorité des cas une rééducation de plusieurs mois, des déficits persistent, notamment dans le contrôle neuromusculaire et postural pouvant impacter leur souhait de retour à l'activité et leur performance (5,6).

Lors de notre formation initiale, nous avons pu constater lors des stages cliniques que la manière dont nous communiquons les consignes des exercices au patient changeait en fonction des thérapeutes, et avait une influence sur la réalisation de l'exercice par le patient. Nous nous sommes alors demandé de quelle façon le type d'instruction que nous donnons pouvait agir sur le comportement moteur et quels étaient les mécanismes sous-jacents.

De larges évidences suggèrent que la focalisation de l'individu à une part importante dans la réalisation du mouvement, dans la performance motrice mais influence également l'ensemble du processus d'apprentissage moteur (7). Or, en tant que kinésithérapeutes, et davantage dans le champ musculosquelettique, l'apprentissage moteur est un objectif prioritaire. Une part essentielle de ce mécanisme est la neuroplasticité, qui, selon des rapports récents, semble impactée consécutivement à une lésion du LCA pouvant de ce fait entraîner des compensations motrices non adéquates (8,9).

Des techniques soutenant à la fois l'apprentissage moteur et la neuroplasticité existent. C'est le cas de la focalisation attentionnelle externe, qui a montré ses nombreux bénéfices

chez des individus sains, abondamment étudié par de nombreux chercheurs, comme Wulf et al. (7,10–12).

Une revue systématique de Sturmborg et al. parue en 2013 conclut que la focalisation attentionnelle externe est plus efficace pour l'apprentissage moteur dans les problématiques musculosquelettiques, mais aucune étude avec une population post reconstruction du LCA n'a été incluse dans cette revue (13). Nous nous interrogeons alors sur **l'intérêt que peut avoir l'utilisation de la focalisation attentionnelle externe pour améliorer le contrôle neuromusculaire et postural en rééducation d'une rupture du LCA.**

Afin de répondre à cette question, nous avons organisé notre écrit en plusieurs parties. Pour commencer, nous exposons un état des lieux des connaissances actuelles sur le sujet au travers d'un cadre théorique. Ensuite, nous avons choisi une méthodologie nous permettant d'extraire les articles les plus pertinents pour répondre à notre question, puis nous avons analysé leurs résultats. Enfin, dans notre discussion, nous revenons sur ces résultats d'un point de vue critique, et nous mettons en avant les limites de notre travail pour en dégager des perspectives de recherches mais avant tout des informations pertinentes pour notre pratique professionnelle.

2 Cadre théorique

2.1 Lésion du LCA, données épidémiologiques

L'incidence des ruptures du LCA est complexe à déterminer car toutes les blessures de cet ordre ne sont pas systématiquement référencées et les chiffres peuvent fortement varier en fonction du contexte considéré. Cependant, les plus hauts taux de blessure sont retrouvés dans le sport, avec une incidence relativement élevée : 0,8-2,4% chez les athlètes masculins et 2,0-3,2% chez les athlètes féminines (2). Ces chiffres augmentent selon l'intensité de la pratique, notamment dans les sports collectifs de pivot, avec changements de direction (e.g., basketball, football, volleyball, handball) et également dans le ski alpin (2,14,15). Aux Etats-Unis, il est estimé à 120 000 chaque année le nombre de ruptures du LCA, avec un risque relatif 2,1 à 3,4 fois plus élevé chez les athlètes féminines par rapport aux athlètes masculins, pour un même niveau de pratique (16). Une étude rétrospective de 2022 a recensé les blessures localisées au genou, ayant eu lieu en WNBA (Women's National Basketball Association) entre

1998 et 2019 ; 99 joueuses ont subi une blessure au genou, dont 37% une lésion du LCA (17). Une revue systématique de 2022, analysant les pratiques sportives collectives avec ballon, montre que la rupture du LCA ayant lieu selon un mécanisme « sans contact » est majoritaire, que le risque est plus important en compétition qu'à l'entraînement, chez les femmes (63%) que chez les hommes (50%), chez les adolescents (68%) que chez les adultes (55%) (18).

Comme le montrent les bases de données PMSI MCO (programme de médicalisation des systèmes d'information / médecine, chirurgie, obstétrique), la prise en charge chirurgicale est fréquente, avec près de 46 000 reconstructions sous arthroscopies réalisées en 2019 en France (1). En plus des nombreuses conséquences à court terme telles qu'une invalidité immédiate et l'arrêt de la pratique sportive pour plusieurs mois, il existe des répercussions majeures à long terme, avec notamment un risque augmenté de développer de l'arthrose précoce ou encore une diminution de la qualité de vie persistante plus de 20 ans après la lésion (3).

Le risque de récurrence est considérable puisqu'il est 15 fois plus élevé que dans la population générale, avec un taux rapporté dans les 2 ans après le retour au sport avoisinant les 30%, affectant davantage les jeunes athlètes et les femmes (10, 11). La reprise de l'activité sportive est l'objectif principal de nombreux athlètes. Seuls 65% des athlètes amateurs reviennent à leur niveau sportif d'avant la blessure, et ce taux diminue à 55% pour un retour à la compétition (4).

2.2 Physiopathologie, mécanismes lésionnels dans les sports de pivot

La lésion du LCA se produit sans-contact dans 70 à 80% des cas, à la réception d'un saut, aux changements de direction rapides ou encore aux décélérations soudaines (21). Le mécanisme de lésion doit être considéré de façon tridimensionnelle, avec une association de contraintes en rotation médiale du genou et adduction de la hanche, ajoutées à une traction antérieure du tibia sous l'action du quadriceps et une légère flexion du genou (20-30°) (22). Des analyses semblent montrer que cette blessure survient dans les 30 à 100ms après le contact initial du pied avec le sol (14, 15).

Par ailleurs, des études indiquent que les hommes et les femmes n'ont pas des mécanismes de blessures tout à fait similaires. Les femmes présentent souvent le même mécanisme de lésion du LCA par effondrement du genou que les hommes, mais des

différences dans le plan sagittal sur les mouvements de hanche sont souvent retrouvées (24). En effet, chez les femmes, une diminution de la flexion de hanche augmente le risque de lésion du LCA, en diminuant la capacité d'absorption des contraintes, notamment lors des phases de réception, et par compensation avec une augmentation des déplacements du genou dans le plan frontal (17, 18).

2.3 Facteurs de risque de lésion dans les sports de pivot

Dans l'objectif de mettre en place des programmes de prévention adaptés, de nombreux efforts ont été consacrés à essayer d'identifier les profils présentant un risque accru de lésion du LCA. Toutefois, il est nécessaire de rappeler que la blessure présente une dimension multifactorielle, issue de l'interaction entre plusieurs déterminants selon un contexte considéré, comme l'expliquent Bittencourt et al. avec la modélisation de réseaux d'interactions différents selon la pratique sportive étudiée (Figure 2.1)(27).

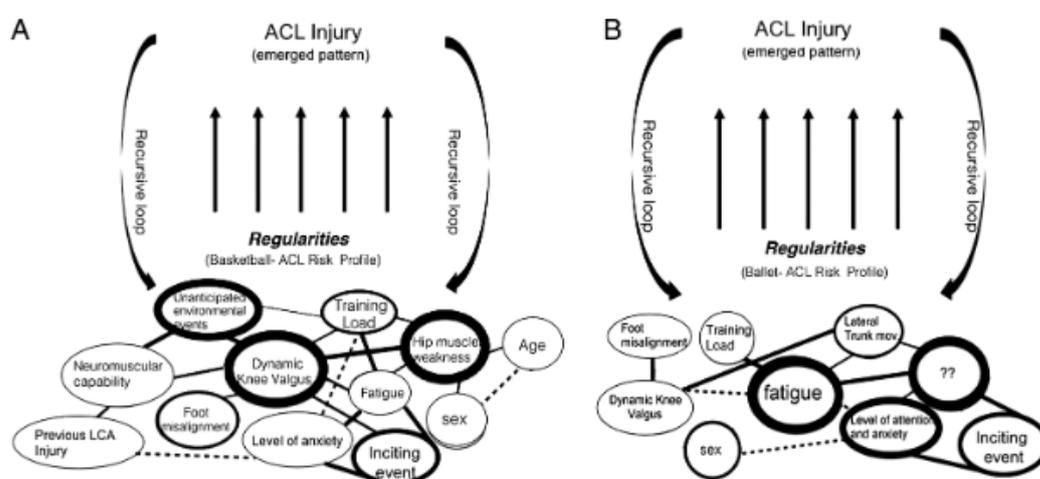


Figure 2.1- Réseaux des déterminants pour une blessure du LCA chez le basketballer (A) et chez une danseuse étoile (B) (Bittencourt et al. 2016)

Les facteurs de risques sont classiquement classés en deux catégories : intrinsèques et extrinsèques, c'est-à-dire respectivement dépendants de facteurs internes (propres à l'individu) ou externes (propres à l'environnement) (28). Ils peuvent être modifiables ou non.

En facteurs extrinsèques, nous retrouvons tout d'abord le type de pratique, avec notamment une augmentation de l'incidence des blessures en compétition par rapport à l'entraînement (18). La surface au sol est également à considérer, avec un risque accru sur les

sols artificiels par rapport au parquet pour les sports en salle (29). Pour les pratiques d'extérieur, comme le football, aucun résultat n'a montré un risque accru de blessure sur surface synthétique par rapport aux surfaces en herbe (30). Ajouté à cela, nous pouvons citer les conditions météorologiques comme autre facteur extrinsèque (28).

Concernant les facteurs de risque intrinsèques, des éléments sont retrouvés unanimement dans la littérature. Premièrement concernant les facteurs intrinsèques non modifiables nous retrouvons des facteurs physiologiques, tel que le sexe. Comme énoncé précédemment, les femmes présentent un risque supérieur de subir une lésion du LCA comparativement aux hommes (7, 20). Anatomiquement, la laxité articulaire, la pente tibiale, le récurvatum de genou, le valgus structurel du membre inférieur, l'antétorsion fémorale et la taille de l'échancrure intercondylienne sont à prendre en considération (20, 23, 24). Les variations hormonales, notamment chez les femmes en phase pré-ovulatoire, ont des répercussions sur la laxité ligamentaire pouvant influencer sur le risque de blessure (28,32,33). Les antécédents personnels et familiaux représentent un risque non négligeable de lésion. Les personnes ayant déjà subi une lésion du LCA sont plus susceptibles de subir une récurrence ipsilatérale ou contralatérale, tout comme les individus ayant des antécédents familiaux de lésion du LCA (18,20).

Concernant les facteurs intrinsèques modifiables, d'autres déterminants physiologiques, biomécaniques et neuromusculaires peuvent majorer le risque de blessure. Parmi eux, un indice de masse corporelle élevé, une fatigue excessive et un déconditionnement physique sont des éléments physiologiques à prendre en compte (21,28). À propos des facteurs biomécaniques, nous retrouvons une force de réaction au sol plus importante, une rotation médiale de hanche et latérale du tibia majorée, un déficit de flexion de hanche et du genou ainsi qu'une augmentation du valgus dynamique du genou à l'atterrissage (21,26,34,35)(Figure 2.2). Du point de vue neuromusculaire, un déséquilibre d'activation du couple quadriceps/ischios-jambiers en faveur du quadriceps accroît le risque de rupture du

LCA, tout comme un déficit des abducteurs et rotateurs latéraux de hanche ainsi que du tonus du tronc (26,28).

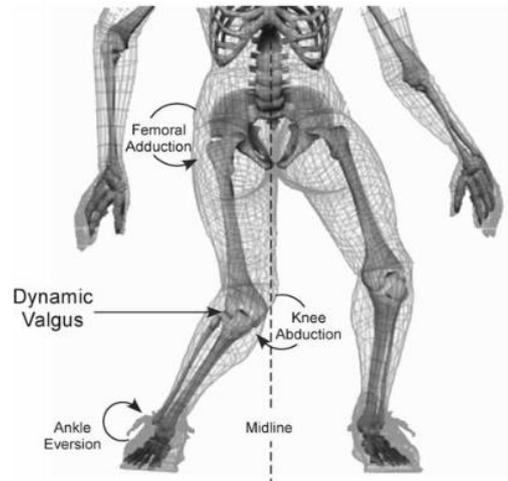


Figure 2.2- Le valgus dynamique, un mouvement tridimensionnel (Hewett et al. 2005)

Les facteurs de risque d'une seconde lésion du LCA ont eux aussi été étudiés. Des déficits neuromusculaires et biomécaniques persistent après la première blessure. Nous pouvons notamment noter : une modification des moments de rotation de la hanche dans la jambe non impliquée, une augmentation du mouvement du genou dans le plan frontal lors de l'atterrissage, des asymétries du moment du genou dans le plan sagittal lors du contact initial et des déficits de stabilité posturale dans la jambe reconstruite (6).

Des données assez récentes avancent le rôle des facteurs neurocognitifs dans la survenue des lésions musculosquelettiques, et notamment dans le mécanisme de lésion du LCA (36). La survenue d'un événement traumatique telle qu'une rupture du LCA se déroule le plus souvent lors de situations complexes, sous contraintes multiples, à haute intensité avec une demande cognitive importante comme cela peut être le cas lors de situations sportives. Dans les sports comme le handball, le football, le rugby ou encore le basket-ball, les athlètes évoluent dans un environnement imprévisible qui exige une prise de décision rapide et spontanée face à des adversaires au comportement imprédictible (37). Des études récentes suggèrent également une association entre la diminution des performances neurocognitives, que nous expliquerons plus loin, et les lésions du LCA (5,37). En effet, un défaut ou retard dans l'intégration des informations sensorielles et motrices a une influence sur le contrôle

neuromusculaire, pouvant engendrer un comportement biomécanique à risque de lésion du LCA (5).

Une mauvaise performance cognitive serait donc associée à un profil de risque de blessure plus élevé lors de mouvements demandant des ressources cognitives accrues. Cette situation peut se retrouver dans un environnement où les ressources attentionnelles sont fortement sollicitées (prise d'informations multiples) et /ou lors de la réalisation d'un mouvement corporel complexe voire non maîtrisé (manque d'automatisme).

2.4 Ligament croisé antéro-externe (LCA-E)

2.4.1 Le LCA dans l'entité anatomique du genou

Le genou, articulation de situation intermédiaire dans le membre inférieur, est une articulation portante, complexe de fonctionnement et soumise à de nombreuses contraintes. Composée des articulations fémoro-patellaire (trochléenne) et fémoro-tibiale (bicondylienne), indissociables anatomiquement et biomécaniquement, elle se retrouve fortement sollicitée dans les activités de la vie quotidienne et sportives. Se révélant peu congruente, la stabilité de cette articulation lors des mouvements de flexion, extension et rotation est assurée d'une part par un système passif ménisco-capsulo-ligamentaire (en plus de la structure osseuse) et d'autre part d'un système musculaire actif. Les ligaments antéro-externe (LCA-E) et postéro-interne (LCP-I) sont croisés dans les plans sagittal et frontal et composent un système de pivot central puissant situé dans la fosse intercondylienne, formant avec les ligaments collatéraux, médial et latéral, le système passif ligamentaire du genou. Ce système de pivot central permet le maintien d'une tension constante quel que soit le degré de flexion du genou. Le LCA, ligament intra-articulaire et extra-synovial, est orienté en haut en arrière et en dehors. Il s'insère dans la zone médiale du condyle fémoral latéral et se termine au centre de l'éminence du plateau tibial, à côté de la corne antérieure du ménisque latéral (38).

2.4.2 LCA, anatomie et rôle dans la stabilité passive

Sujet de controverse, l'anatomie du LCA a été décrite pendant longtemps en deux faisceaux: un antéro-médial et un postéro-latéral, ayant chacun un rôle différent dans la stabilisation antéro-postérieure et rotatoire de l'articulation (39). Plus récemment, il a été

montré dans plusieurs études que sa structure se compose d'un monofaisceau, plat et en ruban, dont la torsion varie en fonction du degré de flexion du genou(40,41).

Composé principalement de collagène de type I (90% contre 10% de collagène de type III), cette structure ligamentaire est le principal stabilisateur de la translation antérieure du tibia sur le fémur, avec une résistance en traction maximale de l'ordre de 1725 ± 270 N dans des positions extrêmes de flexion et d'extension. Son orientation lui permet également d'assurer le contrôle de la rotation médiale du tibia sur le fémur, et d'avoir un rôle secondaire dans la stabilisation frontale en varus et valgus, en synergie avec les ligaments collatéraux (42). Faiblement vascularisé, le LCA est en revanche richement innervé, et possède de nombreux mécanorécepteurs sensoriels lui attribuant une fonction proprioceptive majeure (43).

2.4.3 Rôle dans la stabilité active

Ajouté à son rôle mécanique, des chercheurs tels que Schultz et al (1984) et Zimny et al. (1986) ont été les premiers à mettre en évidence l'existence d'un réseau neuronal et de structures nerveuses dans l'architecture du LCA, lui conférant un rôle sensoriel majeur dans la proprioception du genou (44,45). La proprioception peut être définie comme le sens nous permettant de déterminer, de façon consciente ou non, la position et le mouvement de nos segments corporels dans l'espace et les uns par rapport aux autres, sur la base de messages issus de propriocepteurs. Il existe la proprioception inconsciente, relative au tonus musculaire ainsi qu'aux ajustements posturaux, et la proprioception consciente, reposant sur le traitement des informations proprioceptives. Cette dernière possède deux propriétés : la sensibilité à la position des articulations (stathésie) et la sensibilité au mouvement et ses caractéristiques de vitesse, d'amplitude et de direction (kinesthésie) (46,47). Au niveau organisationnel, la proprioception se divise en trois sous-systèmes ; les entrées, les voies de transmission et les sorties, représentées par les effecteurs musculaires. Plusieurs types de récepteurs proprioceptifs sont retrouvés. Les corpuscules de Ruffini, sensibles à la pression et l'étirement cutané. Les corpuscules de Pacini, réagissant à la vitesse du mouvement et l'accélération angulaire de l'articulation. Les organes tendineux de Golgi, fournissant des informations sur l'estimation et les variations de force de contraction du système musculo-tendineux. Les terminaisons nerveuses libres, répondant aux stimuli nociceptifs.

Ces récepteurs sensoriels interagissent avec les fuseaux neuromusculaires (FNM) par l'intermédiaire des fibres nerveuses Ia et II (sensitives) et des motoneurons fusiformes γ assurant l'innervation motrice (46). Ces FNM, réagissant à l'étirement musculaire, sont de tous ces organes sensoriels ceux ayant le plus d'impact dans la proprioception consciente (46,48,49). La Figure 2.3 montre une représentation schématique de la proprioception (50).

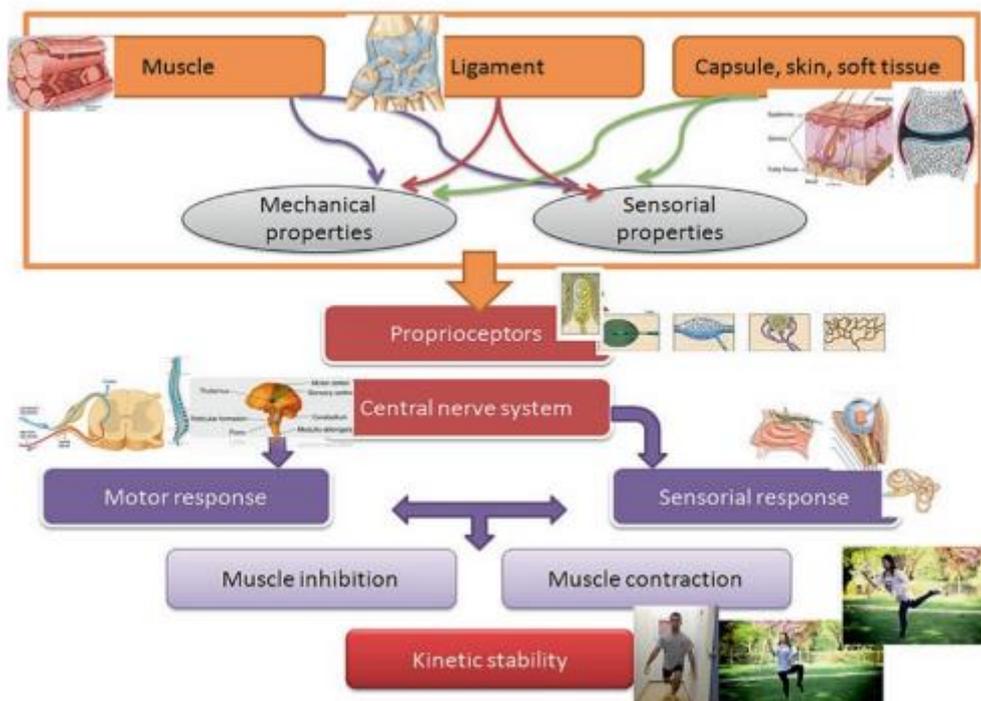


Figure 2.3- Schématisation de la proprioception (Kaya et al. 2018)

Une fois l'information générée, elle emprunte des voies différentes qu'elle soit issue de la proprioception consciente ou inconsciente. Les afférences proprioceptives inconscientes sont dirigées vers la moelle spinale et le cervelet par les tracti spino-cérébelleux, tandis que les afférences proprioceptives conscientes remontent jusqu'au cortex somesthésique primaire par les colonnes dorsales (46,50). Ajouter au système proprioceptif, les afférences visuelles, vestibulaires et parfois même tactiles contribuent au contrôle de la posture et du mouvement (46).

L'implication de la proprioception pour le contrôle neuromusculaire est majeure. Ces informations sensorielles afférentes, traitées par le SNC, permettent un ajustement de la commande motrice via une boucle de rétroaction évaluant la réalisation correcte de la

commande (50). Par conséquent, il semble essentiel d'étudier les capacités proprioceptives dans le cadre d'un traumatisme lésionnel tel que la rupture du LCA.

2.5 Rupture du LCA et système nerveux central, quels liens existent-ils ?

Les lésions du système musculosquelettique, telle que la rupture du LCA, ont longtemps été considérées comme de simples atteintes de la structure et de la fonction biomécanique, sans autre répercussion. De récentes études ont révélé des altérations neurologiques non résolues après cette blessure, pouvant persister suite à la reconstruction chirurgicale et à la rééducation, possible source de limitations fonctionnelles et sportives (51,52). Une lésion du LCA doit être considérée comme un dysfonctionnement neurophysiologique et non uniquement comme un simple trouble musculosquelettique périphérique. De nombreuses preuves sont désormais établies concernant le rôle du cerveau dans le contrôle et l'apprentissage sensorimoteur (53). Une intégration déficitaire ou retardataire des informations sensorimotrices peut conduire à une incapacité à gérer les tâches motrices complexes. De ce fait peuvent résulter des problématiques neuromusculaires et des positions articulaires à risque augmentant la probabilité de lésion du LCA (54). Il semble alors primordial d'évaluer les changements inhérents aux mécanismes centraux associés aux ruptures du LCA.

2.5.1 Déafférentation

Après une lésion du LCA, des études histologiques montrent que les patients présentent une quantité amoindrie de mécanorécepteurs. Notamment, dans le cas où un reliquat de LCA persisterait, ces récepteurs proprioceptifs diminuent progressivement, entraînant une réduction des signaux sensorimoteurs afférents (55). De cette diminution d'informations afférentes résulte une altération du système de régulation de l'innervation motrice au niveau du fuseau neuromusculaire. Ceci affecte particulièrement la contraction musculaire volontaire des fléchisseurs et extenseurs du genou suite à une lésion du LCA et donc la stabilité articulaire et la raideur musculaire préparatoire (56,57). Cette désafférentation périphérique après une lésion est un élément concourant à l'échec persistant d'activation musculaire, principalement du quadriceps dans le cas d'une rupture du LCA (57).

Ajouter à cela, les traumatismes des mécanorécepteurs articulaires peuvent induire des effets neurophysiologiques entraînant des modifications étendues et durables de l'activité neuronale au niveau de la moelle épinière, du tronc cérébral et du cortex (58).

2.5.2 Lésion du LCA et performances neurocognitives

Les patients ayant subi une lésion du LCA recrutent davantage de ressources cognitives et attentionnelles pour pouvoir gérer les situations à haute demande cognitive (36). Cette charge neurocognitive élevée peut en partie expliquer l'incidence élevée des récurrences pour cette population (59). Les fonctions neurocognitives, ou fonctions exécutives, sont essentielles dans les tâches qui demandent de la concentration, de l'adaptation et du contrôle pour répondre aux stimuli internes ou externes (60). Dans le contexte de la pratique sportive, nous retrouvons principalement : l'attention visuelle, la double tâche, le temps de réaction (ou vitesse de traitement de l'information), l'agilité ou motricité fine, et le « self-monitoring » (capacité à ressentir les signaux proprioceptifs) (61). Un déficit dans le temps de réaction et le temps de traitement de l'information, une atteinte de la mémoire visuelle et verbale et détérioration du contrôle postural sont retrouvés chez les patients ayant subi une lésion du LCA (5,37,61). Ces résultats sont amplifiés lors d'exercices en double tâche, en comparaison à une population saine.

Des déficiences dans ces dimensions neurocognitives peuvent entraver la capacité de l'athlète à réagir correctement dans son environnement de jeu, pouvant entraîner une plus grande probabilité de se livrer à des actes moteurs et biomécaniques présentant un risque élevé de blessure. (54). En parallèle de ces altérations neurocognitives, une réorganisation corticale est observée suite au traumatisme.

2.5.3 Modifications de l'activité cérébrale : neuroplasticité post lésionnelle

La neuroplasticité désigne la capacité du système nerveux central à s'adapter en réponse à des facteurs extrinsèques (environnementaux) ou intrinsèques (e.g. lésion anatomique). Ces adaptations peuvent impliquer des modifications des stratégies cognitives globales, le recrutement de différents circuits neuronaux, l'amplification ou la réduction de l'implication de certaines connexions ou zones cérébrales. (62). Les lésions tissulaires, telle la rupture ligamentaire, provoquent une perturbation des informations proprioceptives

afférentes, ayant pour cause l'inflammation et la douleur liées à la lésion, entraînant des modifications de transmissions synaptiques et d'excitabilité neuronale (57,63). S'en suit une réorganisation corticale chez les athlètes blessés.

Des études de neuro-imageries utilisant des analyses par électroencéphalogramme (EEG), par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et TMS (stimulation magnétique transcrânienne) ont fait ressortir une modification de l'activité cérébrale chez les personnes ayant déjà subi une lésion avec ou sans reconstruction du LCA (ACLR) (8,52,64). Dès 1996, Valeriani et al décrivaient une absence de stimulation du cortex somato-sensoriel en lien avec des mesures cliniques de proprioception, sans résolution après chirurgie (65). Dans ce domaine, les études suggèrent des changements d'activité à la fois dans les zones corticales cognitives, sensorielles et motrices. Lors de tâches motrices simples, une augmentation de l'activité dans les zones impliquées dans la focalisation attentionnelle (cortex frontal) atteste de la nécessité d'utiliser davantage de ressources cognitives après une lésion du LCA (53). Ce constat rejoint les altérations neurocognitives évoquées précédemment. Concernant le versant sensoriel, Grooms et al. ont montré que les patients ayant eu une lésion du LCA présentent entre autres une activation diminuée dans les aires somatosensorielles (intégration sensori-motrice) et augmentée dans les aires visuelles (gyrus lingual/cortex visuel) (8). Concernant le cortex moteur, il présente une diminution de son excitabilité, impliquant une activité corticale dans les aires motrices accentuée pour déclencher la commande motrice, notamment pendant l'extension/flexion du genou dans le groupe ACLR (8,57). Cette réorganisation corticale, persistant plusieurs années après la blessure chez les athlètes, suggère un changement dans le profil d'activation cérébrale post ACLR. La stratégie visuelle-motrice par opposition à une stratégie sensori-motrice, est préférée, concernant la gestion du mouvement du genou (8).

Cette dépendance visuelle, liée à la réorganisation corticale et sensorielle, permet aux athlètes de compenser le déficit de signaux proprioceptifs, dans le but de maintenir une stabilité posturale efficiente (51). Cependant, lors d'une tâche plus complexe, avec perturbation visuelle ou ajout d'une tâche cognitive (e.g. mémoriser une série de chiffres), le contrôle postural se voit dégradé chez les patients ayant subi une rupture du LCA (8).

Le tableau suivant résume l'ensemble des altérations centrales consécutives au traumatisme.

Tableau 2.1-Altérations centrales liées à une rupture du LCA

<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Altérations motrices</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diminution de l'excitabilité motrice (augmentation du seuil moteur) (8,57). ▪ Activité cérébrale augmentée dans les aires motrices (8,57).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Altérations sensorielles</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diminution des afférences proprioceptives vers le SNC (55,58). ▪ Diminution de l'activité cérébrale dans les aires somatosensorielles (8,65). ▪ Augmentation de l'activité cérébrale dans les aires visuelles (8). ▪ Augmentation de l'activité cérébrale dans les aires liées à la focalisation attentionnelle (53) .
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Performances neurocognitives</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Demande attentionnelle augmentée (53). ▪ Augmentation du temps de réaction et du temps de traitement de l'information (5,37,61). ▪ Atteinte de la mémoire visuelle et verbale (5,37,61). ▪ Diminution du contrôle postural lors de l'ajout de tâches cognitives (5,37,61).

La lésion du LCA ne doit pas être considérée comme une simple atteinte musculosquelettique périphérique, mais comme un traumatisme complexe engendrant des réorganisations au sein du système nerveux central potentiellement responsables d'une augmentation du risque de récives.

2.5.4 Contrôle postural et rupture LCA

Le contrôle postural désigne la faculté à maintenir la projection du centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation en position debout, afin d'établir ou de restaurer un équilibre stable (66,67). Cette capacité sous-entend une intégration proprioceptive optimale des informations sensorimotrices perçues par l'organisme, afin de produire une réponse motrice et un comportement biomécanique adaptés à la situation rencontrée (36). Facteur important de la performance sportive, le contrôle postural est un sujet qui a été fréquemment étudié (68,69). Dans le cas de la rupture du LCA, le contrôle postural se voit altéré, en comparaison à des sujets sains (70). Ce déficit est notamment retrouvé dans des conditions de tests dynamiques (surfaces instables, perturbations extérieures, etc.) (71). Selon Lehmann et al (2017), cette altération se manifeste de façon majeure lors de tâches unipodales les yeux ouverts (72). Au cours d'une tâche d'équilibre unipodal quelques semaines après l'ACLR, une augmentation de l'activité corticale dans les zones somatosensorielles et visuelles est retrouvée chez les sujets blessés par rapport aux sujets sains (73). Ce mécanisme compensatoire renvoie à la mise en place de nouvelles stratégies pour assurer un contrôle postural efficace du côté lésé. De plus, suite à une rupture du LCA et comparativement à une population saine, des efforts plus importants sont demandés pour maintenir une stabilité posturale. Cette différence peut perdurer plus de 20 ans après la lésion (74). Cette détérioration du contrôle postural paraît essentiellement due à la désorganisation de la pondération sensorielle, impactant alors le contrôle moteur lors de situations complexes non anticipées (75,76).

2.6 Neuroplasticité lésionnelle et apprentissage moteur

Il est donc largement admis qu'une lésion périphérique induit une cascade de phénomènes neuroplastiques pouvant persister des années après la blessure. Outre l'influence de la lésion tissulaire elle-même, la neuroplasticité est aussi régie par des facteurs externes comme l'expérience et l'entraînement/apprentissage (62). Cette plasticité cérébrale basée sur l'expérience peut être réparatrice, avec la formation de nouveaux réseaux neuronaux pour restaurer ou maintenir une fonction, ou développementale, avec la formation ou la réorganisation de connexions synaptiques pour apprendre ou affiner une compétence (77). Ces deux principes étayent les mécanismes de l'apprentissage moteur, défini par Schmidt

et Lee comme « un ensemble de processus associés à la pratique ou à l'expérience conduisant à des changements relativement permanents dans la capacité de mouvement » (78). Ce processus se décompose en trois temps :

- (1) l'acquisition : étape initiale (e.g. exécution d'un exercice).
- (2) la rétention : preuve de la réalisation correcte après un certain délai suivant l'arrêt de l'exercice.
- (3) le transfert : capacité d'exécuter l'habileté motrice acquise dans une tâche motrice différente et dans les activités de la vie quotidienne (79).

La réorganisation du SNC étant sensible aux informations sensorielles perçues, nous pouvons faire un lien important entre l'apprentissage moteur et la neuroplasticité en découlant.

À ce jour, la littérature ne présente pas d'études ayant porté sur les changements de l'activité cérébrale tout au long de la rééducation, et sur la manière dont ils peuvent être liés à certaines mesures cliniques et/ou performances fonctionnelles (53). Néanmoins, certains auteurs tels que Gokeler et al., Benjamise et al. ou encore Grooms et al. ont émis des recommandations relatives aux thérapies à mettre en place chez ces patients sur la base d'observations sur les différences d'activité cérébrale (6,51,80). Nous notons le rôle important de la communication autour de la prescription des exercices, et notamment le feedback (retour d'informations) donné au patient par le thérapeute lors de la réalisation d'un exercice.

2.6.1 Focalisation attentionnelle et apprentissage moteur

En rééducation musculosquelettique, les instructions données au patient sont un élément important à considérer. Elles permettent de guider l'attention, d'orienter, de corriger et d'affiner la réalisation d'un mouvement. La focalisation (ou focus) attentionnelle décrit la façon dont l'orientation attentionnelle du patient est guidée lors de la réalisation d'un geste ou d'une habileté motrice. Elle peut être interne ou externe. Les instructions qui dirigent l'attention du patient sur ses propres mouvements, une partie de son corps induisent une focalisation attentionnelle interne (FAI) et un contrôle conscient du mouvement(10). Au contraire, la focalisation attentionnelle externe (FAE) demande au patient d'orienter son attention sur les conséquences de ses mouvements dans l'environnement, amenant un

contrôle plus automatique du mouvement (6,10). Des exemples de FAE et FAI verbales lors d'exercices sont présentés en Annexe I – Exemples d'instructions avec FAI ou FAE, tirés de l'étude de Hunt et al (2017)(81)., issus de travaux de Hunt et al. (81).

La focalisation attentionnelle, en influençant la capacité de l'apprenant à réaliser et à conserver un mouvement de qualité, est un facteur essentiel de la performance motrice et de l'acquisition de compétences (7).

Des études scientifiques ont mis en évidence que les kinésithérapeutes ou autres thérapeutes adoptent majoritairement la FAI lors de leurs instructions. Durham et al (2009), dans leur étude sur le type d'instructions communiquées à des patients hémiplegiques ont relevé que sur les 247 consignes différentes données, 236 utilisaient le FAI (82). Pourtant, un grand nombre de recherches sur les processus d'apprentissage ont mis en avant les bénéfices de la FAE. De nombreux travaux, dont ceux de Wulf et al, ont montré que la FAE favorise la rétention et l'automatisation du geste, la fluidité du mouvement et fait diminuer la demande attentionnelle nécessaire à la réalisation du mouvement (7,10,11). Ces auteurs expliquent ce phénomène par l'hypothèse de « l'action contrainte ». Elle suppose que lorsque les sujets focalisent leur attention sur leurs mouvements (FAI), ils tentent consciemment d'intervenir dans les processus de contrôle qui régulent la coordination de leurs mouvements. Ce contrôle actif perturbe les processus automatiques qui assurent l'efficacité du mouvement et conduisent à une dégradation des performances et de l'apprentissage. À l'inverse, la FAE encourage un fonctionnement naturel et le système moteur s'organise sans être contraint par les processus conscients. Les mouvements s'exécutent alors de manière rapide, inconsciente et automatique (7,11,12).

2.6.2 Activité neuronale et focus attentionnel externe

L'étude des mécanismes neuronaux sous-jacents à la FAE est récente, et certains résultats commencent à émerger. L'activité corticale résulte d'un équilibre entre les circuits inhibiteurs et excitateurs. La focalisation attentionnelle a la capacité d'affecter les processus intracorticaux excitateurs et inhibiteurs et donc d'influencer directement la façon dont le SNC gère le contrôle moteur (83). Notamment, la FAE augmente l'inhibition intra corticale. Or, suite à une lésion du LCA, une inhibition intra corticale déficiente est corrélée à une altération de l'activation volontaire du quadriceps (84). Il semble donc qu'un entraînement avec FAE

permette de restaurer cette capacité de contraction volontaire en ciblant un mécanisme neurophysiologique responsable de la modification d'un comportement moteur.

2.6.3 FAE et contrôle postural

L'altération du contrôle postural est un facteur de risque important de récurrence de rupture du LCA. Une première lésion du LCA augmente le risque d'une nouvelle blessure en raison du manque d'automatisme du contrôle postural, persistant même après reconstruction chirurgicale (85). Il semble alors bénéfique dans ce cadre de trouver des solutions pour automatiser la stabilité posturale, en diminuant l'attention apportée lors de ce processus. Park et al., dans leur revue de 2015, ont mis en avant l'intérêt de la FAE par rapport à la FAI pour l'amélioration du contrôle postural, notamment lorsque le niveau de difficulté de l'ajustement postural demandé est plus élevé (86). Le focus attentionnel externe, par ces processus sous-jacents, induit un contrôle moteur plus automatique, et est généralement recommandé pour détourner l'attention lors de tâches nécessitant un contrôle postural (6,10,87).

3 Question de recherche

La persistance de déficits biomécaniques, posturaux, mais également centraux ainsi que le risque élevé de récurrence chez nos patients ayant enduré une rupture du LCA nous amène à nous questionner sur notre prise en charge rééducative. En effet, malgré les nombreuses recommandations et les programmes de prévention existants, le retour à l'activité reste difficile et le taux de blessures important. En tant que rééducateurs, nous devons répondre aux conséquences de ce traumatisme et proposer à nos patients les méthodes et les moyens les plus adaptés pour restaurer leurs fonctions et répondre à leurs besoins.

Aujourd'hui, les connaissances sur le LCA s'élargissent et mettent en avant l'implication des altérations centrales et de la neuroplasticité post-lésionnelle dans l'apprentissage moteur et la récupération sensorimotrice. Des techniques utilisables en rééducation existent, soutenant l'apprentissage moteur et la plasticité cérébrale adaptative. C'est le cas de la focalisation attentionnelle externe, qui a montré son importance dans l'acquisition et la réalisation de compétences motrices, influençant positivement les processus attentionnels sous-jacents.

Une revue systématique de Sturmborg et al en 2013 a conclu que l'exercice avec FAE est plus efficace pour l'apprentissage moteur dans les troubles musculosquelettiques (13). Cependant, à notre connaissance, aucune revue systématique n'a étudié l'effet de la FAE sur les déficits de comportements biomécaniques et de contrôle postural persistant suite une lésion du LCA uniquement, et dans une population sportive.

Nous allons tenter de répondre à la question de recherche suivante :

Quels-sont les effets de l'utilisation de la focalisation attentionnelle externe en rééducation, sur les comportements biomécaniques et le contrôle postural, chez les patients ayant subi une lésion du LCA ?

Nous vérifierons les hypothèses suivantes :

- L'utilisation de la FAE en rééducation améliore la biomécanique et le contrôle postural du patient après une lésion du LCA.
- Les comportements biomécaniques et le contrôle postural acquis après un entraînement avec FAE peut être maintenu dans le temps.
- Les comportements moteurs acquis en rééducation avec FAE sont difficilement transférables à la pratique sportive.

4 Matériel et méthode

4.1 Choix de la méthode

Afin de répondre à la question de recherche, nous avons décidé de réaliser une revue systématique de littérature. Cette méthodologie, que nous détaillerons dans les parties ci-dessous, est la plus appropriée pour recueillir les publications scientifiques pertinentes et actuelles concernant notre questionnement.

4.2 Critères PICO

Conformément aux recommandations PRISMA (*Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols*) et afin de nous aider à formuler les équations de recherche nécessaires pour cibler les articles les plus appropriés, nous établissons des critères PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*) (Tableau 4.14.1)(88).

Tableau 4.1- Critères PICO

Population	Personnes sportives (hommes ou femmes), post reconstruction du LCA
Intervention	Exercices/tâches avec instructions verbales en FAE
Comparison	Aucune ou toutes autres modalités d'instructions (e.g. : FAI) lors de l'exercice
Outcome(s)	Evaluation de la mesure du contrôle postural, et du comportement biomécanique sur des tâches statiques et dynamiques, simples ou complexes

4.3 Bases de données interrogées

Les bases de données suivantes ont été interrogées : PubMed (National Institutes of Health) et ScienceDirect (Elsevier Masson) en tant que références dans le domaine de la santé, ainsi que PEDro (Physiotherapy Evidence Database) comme base de données spécifiques à la kinésithérapie.

4.4 Mots clés Equations de recherche

Relativement aux critères PICO et à l'aide de l'outil MeSH, nous avons établi des mots clés nous permettant d'écrire les équations de recherche utilisées pour questionner les bases de données (Tableau 4.2).

Tableau 4.2- Mots clés en anglais

Population	« athletes » OR « team-ball sports » AND/OR « handball » AND/OR « basketball » AND/OR (« football » OR « soccer ») AND/OR « pivoting sports » « ACL injury » OR « knee injury » OR « non-contact ACL » OR « anterior cruciate ligament »
Intervention	« external focus attention » OR « external focus » OR « external feedback » OR « external instructions » OR « external focalization » OR « external focus training » OR « external focus exercise »
Comparison	
Outcome	« postural control » OR « stability control » OR « knee control » OR « postural balance » OR « knee valgus » OR « biomechanics »

En fonction des bases de données interrogées et de leurs modalités de traitement propres à chacune, nous avons adapté les équations de recherche. En effet, seul huit connecteurs booléens sont acceptés pour Science Direct, et aucun pour PEDro. D'autre part et dans l'intention d'explorer de façon la plus exhaustive possible ces bases de données, les équations ont été simplifiées du fait du silence documentaire rencontré sur le sujet (Tableau 4.3 - *Équations de recherche*).

Tableau 4.3 - Équations de recherche

Base de données	Exemple d'équation de recherche (en anglais)	Nombre de résultats obtenus
Pubmed	("external focus" OR "external feedback" OR "focus attention" OR "external instructions") AND ("ACL" OR "ACL injury" OR "knee injury" OR "anterior cruciate ligament")	32 résultats
Science Direct	("external focus" OR "external feedback") AND ("ACL" OR "knee injury" OR "anterior cruciate ligament") AND (("biomechanics" OR "knee valgus") OR ("postural control" OR "postural stability"))	63 résultats
PEDro	"external focus"	15 résultats

4.5 Critères d'inclusion et d'exclusion

Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été déterminés afin de sélectionner nos articles.

➤ Critères d'exclusion :

- Texte intégral non obtenu.
- Etudes n'étant pas une recherche primaire.
- Population avec une autre pathologie que la rupture du LCA ou rupture du LCA combinée à une autre pathologie (e.g. dysfonction neurologique).
- Population non sportive.
- Etudes non rédigées en anglais ou français.

➤ Critères d'inclusion :

- Qualité méthodologique acceptable (e.g. ECR score PEDRO >4/10 et échelle Newcastle-Ottawa « moyenne » ou « bonne »)

- Population sportive ayant subi une reconstruction du LCA ou saine sans pathologie
- Article publié jusqu'au 1/02/2023.
- L'intervention doit porter sur les effets de la FAE sur les mesures de contrôle postural et le comportement biomécanique dans la population considérée.
- Evaluation des paramètres biomécaniques/de contrôle postural lors de tâches simples ou complexes, statiques ou dynamiques.
- Les groupes dans les études doivent avoir une population qui ont des caractéristiques comparables.

Cette revue a été inclusive en ce qui concerne le type de conception des études en raison du peu d'études publiées. Des ECR (essais contrôlés randomisés), quasi-randomisés et non randomisés, des essais croisés, des études d'observation, de cohorte et des études cas-témoins peuvent être inclus, du moment que ces études soient des recherches primaires. Les références doivent être rédigées en anglais ou français et sont incluses avec ou sans aveuglement des participants, du ou des thérapeutes traitants et du ou des évaluateurs, et quelle que soit la durée de l'entraînement et du suivi.

4.6 Sélection des articles

L'ensemble des articles retenus dans les bases de données a été importé dans le logiciel Zotero, permettant la gestion des références bibliographiques. Les différentes phases du processus méthodologique de recherche sont expliquées ci-dessous, ainsi que dans le diagramme de flux (Figure 4.1).

Nous sommes partis d'un nombre initial d'articles de N=112, dont 1 article issu d'autres bases de données, et pouvant correspondre aux critères demandés. Après élimination des doublons (N=9), nous nous retrouvons avec N=103 articles à étudier.

L'étape suivante consiste en la lecture des titres et résumés afin d'exclure les articles contenant des critères d'exclusion cités ci-dessus (N=96). N=7 articles sont sélectionnés. Pour terminer, nous procédons à la lecture intégrale des articles dans l'intention de vérifier leur éligibilité selon les critères choisis, et l'évaluation méthodologique. Nous retenons finalement un nombre N=3 d'articles.

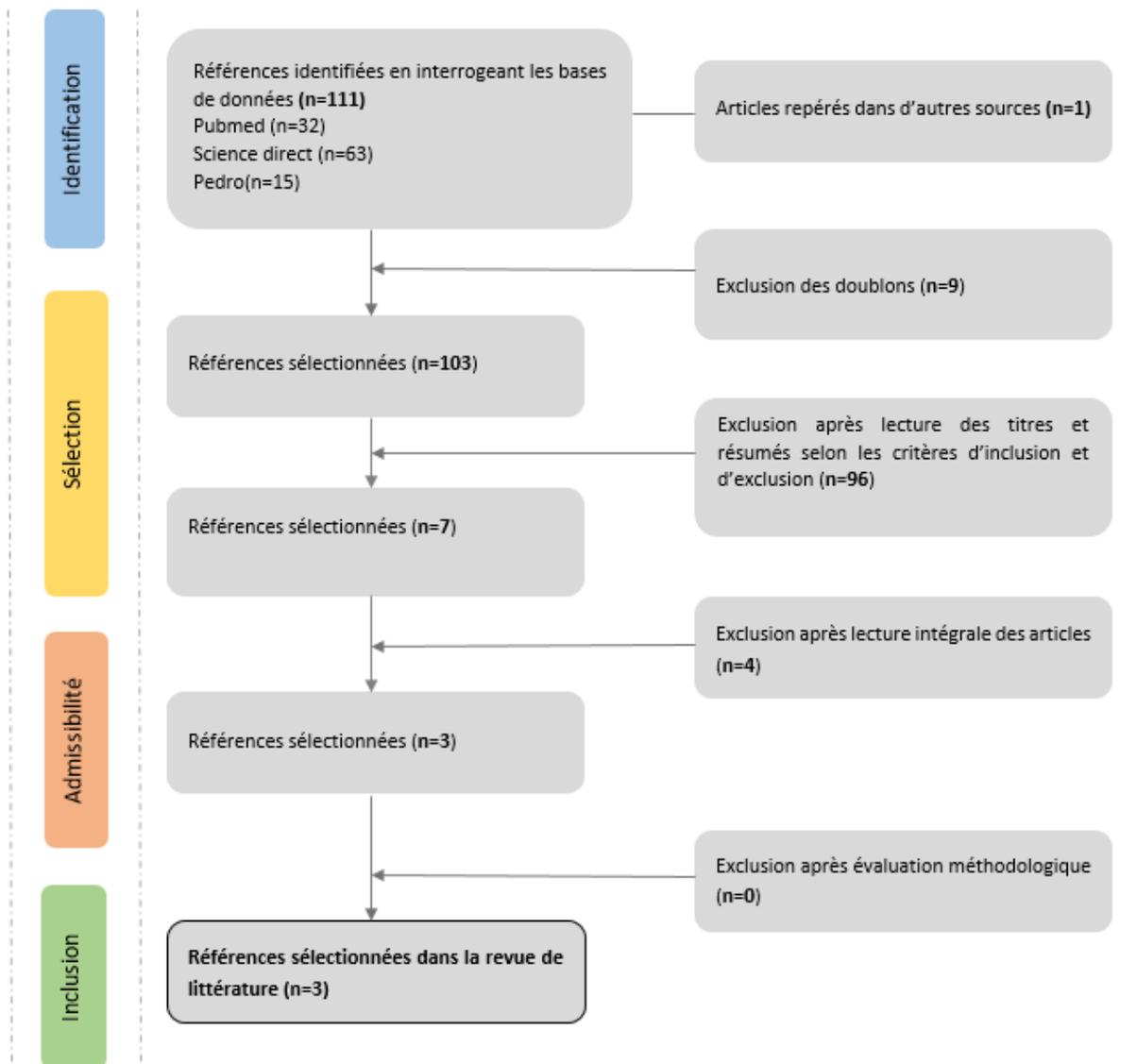


Figure 4.1- Diagramme de flux

5 Résultats

Le processus méthodologique nous a permis de sélectionner trois articles. Nous sommes conscients du faible nombre que cela représente pour construire une revue systématique de littérature, et nous reviendrons sur ce fait dans la discussion. Dans cette partie, nous allons vous présenter les caractéristiques générales et méthodologiques des deux essais contrôlés randomisés (ECR) et de l'étude cas-témoin retenus, ainsi que leurs apports vis-à-vis de notre question de recherche.

5.1 Évaluation méthodologique

D'après la HAS (Haute Autorité de Santé) et conformément à l'*Evidence-Based Medicine* (médecine basée sur les preuves), les ECR représentent le plus haut niveau de preuve des études primaires interventionnelles, tandis que les études cas-témoin ont un niveau de preuve intermédiaire (89,90) .

5.1.1 Études contrôlées randomisées

Afin d'évaluer leur qualité méthodologique, nous avons utilisé l'échelle PEDRO (Annexe II – Échelle d'évaluation méthodologique PEDRO pour les ECR (français)(91). Cette échelle est composée de onze critères et nous donne un score sur dix points. Chaque critère correspond à un point, sauf le premier qui ne rentre pas en compte dans la notation. Comme l'atteste le tableau ci-dessous (Tableau 5.1), nous retrouvons une bonne qualité méthodologique, que ce soit pour l'étude de Ghaderi et al.(92) ou de Gokeler et al. (93) avec des scores respectifs de 8/10 et 7/10.

Tableau 5.1 - Évaluation méthodologique des ECR, échelle PEDRO.

Études	Critères											Score
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Ghaderi & al (2021)	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8/10
Gokeler & al (2015)	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	7/10

Interprétation : 0 = critère non validé / 1= critère validé
Le premier critère (éligibilité) ne rentre pas dans le score final

5.1.2 Étude cas-témoin

L'échelle Newcastle-Ottawa permet d'évaluer la qualité méthodologique des études observationnelles, dont font parties les études cas-témoin (94) (Annexe III : Échelle d'évaluation méthodologique Newcastle-Ottawa, pour les études cas-témoins). Sept items, divisés en trois catégories (sélection, comparabilité et exposition) sont évalués. Le score final est sur neuf points avec respectivement quatre, deux et trois points pour les trois catégories mentionnées ci-dessus. L'évaluation méthodologique de l'étude observationnelle d'Ahmadi et al. est présentée dans le Tableau .2.

Tableau 5.2 - Évaluation méthodologique de l'étude observationnelle avec l'échelle Newcastle-Ottawa.

Étude	Critères	Sélection				Comparabilité	Exposition			Total	Qualité
		Définition appropriée du cas	Représentativité des cas	Sélection du groupe contrôle	Définition du groupe contrôle	Comparabilité des groupes	Détermination de l'exposition	Détermination de l'exposition identique dans chaque groupe	Taux de non-réponse		
Ahmadi & al. (2020)(95)		0	0	1	1	1	0	1	0	4/9	Faible
Interprétation : 0 = critère non validé (0 étoile)/ 1 ou 2 = critère validé (1 étoile ou 2)											
Une étude peut se voir attribuer un maximum d'une étoile pour chaque élément numéroté des catégories « Sélection » et « Exposition ». Un maximum de deux étoiles peut être attribué pour la rubrique « Comparabilité ».											

Pour avoir une qualité « moyenne » ou « bonne », les études doivent présenter au minimum deux points pour la sélection, un ou deux points pour la comparabilité et deux points pour l'exposition. Selon cette échelle, notre étude a une qualité méthodologique faible. Malgré cela, nous décidons de la conserver dans notre revue car elle est la seule étude dont nous disposons qui évalue le contrôle postural pour la population qui nous intéresse. Évidemment, nous prendrons en compte ce détail lors de l'interprétation des résultats.

5.2 Caractéristiques générales des articles

Les caractéristiques générales des études incluses dans notre revue sont présentées dans le tableau ci-dessous (*Tableau 25.3*).

Tableau 2.3 - Caractéristiques générales des études

Auteurs	Type d'étude	Population (caractéristiques)	Intervention et objectif	Outcomes (critères d'évaluation)	Durée de l'intervention	Informations complémentaires
Ghaderi & al (2021) (92)	Étude contrôlée randomisée	24 sportifs masculins 6-12mois post ACLR aptes à l'activité sportive <u>Age</u> : -27.2 ± 3.3 (exp) -26.9 ± 4.1 (contrôle) <u>Sport</u> : ?	Effet d'un programme d'entraînement neuromusculaire avec FAE sur la biomécanique, la proprioception du genou et la fonction rapportée par le patient après ACLR et post rééducation.	-Tests biomécaniques de positionnement articulaire lors d'un atterrissage unipodal, (système motion capture) - Sens de position du genou (proprioception) -questionnaire sur la fonction (IKDC et Tegner).	-8 semaines -3 sessions /semaine les 6 premières semaines puis 2 session pour les 2 dernières semaines (22 au total) -Supervision par 3 entraîneurs experts -Variation des exercices et de leurs modalités chaque semaine.	-1 groupe contrôle sans le programme d'entraînement. -1 groupe avec le programme d'entraînement. 8 exercices différents : Squats bipodal, fentes, squats unipodal, sauts à deux jambes, équilibre unipodal sur surface instable, sauts CMJ à une jambe, sauts horizontaux et sauts en longueur à unipodaux. -À poids de corps.
Gokeler & al (2015) (93)	Étude contrôlée randomisée	16 patients (9 hommes / 7 femmes) post ACLR (>4mois) ayant repris leur activités quotidiennes. <u>Age</u> : > 16 ans <u>Sport(s)</u> : football, handball, basketball, volleyball.	Déterminer l'effet de la FAE et FAI sur la distance et la biomécanique du genou lors d'un saut unipodal horizontal post ACLR.	-Distance du saut -Biomécanique et cinématique du genou (plans sagittal et frontal) : angles, moments, force de réaction au sol, cisaillement antérieur du tibia...)	Évaluation immédiate (1 seule session) 5 sauts par jambe en commençant par le côté non opéré (après 3 sauts d'échauffements) 30s de récupération entre chaque saut.	-Groupe 1 avec consigne FAI :« Sautez aussi loin que vous le pouvez. Pendant que vous sautez, je veux que vous pensiez à étendre vos genoux aussi vite que possible » -Groupe 2 avec consigne FAE :« aussi loin que vous le pouvez. Pendant que vous

						sautez, je veux que vous pensiez à vous pousser aussi fort que possible depuis le sol. » -Pas de groupe contrôle.
Ahmadi & al (2020) (95)	Étude observationnelle (cas-témoin)	Groupe exp : 20 joueurs de football masculins (>6mois post ACLR). Groupe contrôle : 20 joueurs de football masculins sans blessure musculosquelettique. <u>Age</u> : 17 à 45 ans <u>Sport</u> : football	Comparer la FAE et l'ajout de tâche cognitive sur la stabilité posturale après ACLR.	-Contrôle postural (plateau d'équilibre sur plateforme de force) : mesure des variables du centre de pression (COP). -Équilibre statique en position debout, sur une jambe (jambe opérée pour le groupe ACLR -Déviation standard (SD) du COP dans les directions antéro-postérieur (AP) et médio-latérale (ML).	-Évaluation immédiate (1 seule session). -Chaque condition a été répétée 3 fois, de façon aléatoire.	Chaque groupe (ACLR et contrôle) a été évalué dans les 3 conditions suivantes : -FAE (feedback visuel, marqueur niveau à bulle). -CCT (tâche cognitive continue, exercice de mémorisation mentale avec séries de chiffres). -condition contrôle.

Plusieurs différences sont à noter entre ces articles. Concernant la population, nous avons dans chaque étude des personnes sportives ayant eu une chirurgie du LCA. Dans l'étude de Gokeler et al., nous savons que les participants sont mixtes (neuf hommes et sept femmes) et qu'ils ont plus de 16ans, mais nous ne connaissons pas leur âge. Ils pratiquent des sports collectifs (football, handball, basketball, volleyball), qui sont, comme nous l'avons auparavant abordé, à haut risque de blessure traumatique (2,14). De plus, ils sont à plus de 4 mois de leur opération, sans savoir exactement le délai. À l'inverse, dans l'étude de Ghaderi et al., tous les participants sont des athlètes masculins dont nous ne connaissons pas la pratique sportive. Ils ont en moyenne 27ans (22 à 31 ans) et ont été opérés il y a 6 à 12 mois par le même chirurgien. Tous sont aptes à reprendre ou ont repris leur activité sportive. Dans l'article d'Ahmadi et al., le groupe ACLR regroupe exclusivement des footballeurs masculins de 17 à 45ans qui ont retrouvé leur niveau sportif d'avant blessure.

Pour les ECR, les critères d'évaluation que nous retenons pour notre revue sont les mesures biomécaniques. Tous deux étudient des paramètres cliniques relatifs aux angles du genou lors du mouvement considéré. En plus de ces mesures, les chiffres concernant le tronc et la hanche dans l'étude de Ghaderi et al. nous intéressent pour notre analyse. À noter que les mouvements évalués lors des tests biomécaniques ne sont pas similaires. D'un côté nous avons un saut unipodal horizontal (Gokeler et al.) et de l'autre un atterrissage unipodal (Ghaderi et al.). Une différence majeure est observée au niveau de l'intervention et notamment de sa temporalité. Gokeler et al., s'intéressent à l'effet immédiat d'une consigne donnée avec FAE lors d'un exercice, alors que Ghaderi et al. mettent en place un programme d'entraînement neuromusculaire (ENM) avec FAE sur 8 semaines avec plusieurs sessions par semaine. L'ENM comprend des exercices de renforcement des membres inférieurs, de pliométrie, de puissance, d'équilibre, d'agilité et de stabilité. Ce type d'entraînement est recommandé pour la prévention primaire dans la lésion du LCA (96,97). Ghaderi et al. utilisent l'ENM comme support de leur programme d'entraînement, en s'attachant à utiliser la FAE lors de la prescription des exercices. Enfin, Gokeler et al., n'ont pas de groupe contrôle dans leur intervention, et comparent les résultats entre la FAI et la FAE, tandis que Ghaderi et al., ont mis en place un groupe contrôle continuant leur entraînement classique spécifique à leur pratique sportive pendant les huit semaines.

Nous disposons d'une seule étude évaluant le contrôle postural post ACLR. Il s'agit d'une évaluation instantanée sans programme d'entraînement particulier, comparant la FAE, la tâche cognitive continue (CCT) et une condition contrôle. Dans cette étude, la FAE est donnée par un feedback visuel. Les participants devaient s'appliquer à minimiser le mouvement de marqueur du niveau à bulle. La CCT correspond quant à elle à compter mentalement le nombre de fois qu'un chiffre choisi au hasard (de 1 à 9) apparaît dans vingt séries de nombres à trois chiffres, chacune présentée à un intervalle de trois secondes (e.g. compter le nombre de fois que le chiffre 2 apparaissait dans les séquences suivantes : 221, 326, 471, etc.).

Ces différentes caractéristiques seront importantes à considérer lors de l'analyse des résultats qui sont présentés dans la partie suivante.

5.3 Résultats des études

Les résultats significatifs ressortant des études sont détaillés dans le tableau ci-dessous (Tableau 5.4). Ils sont détaillés plus précisément pour les ECR en Annexe IV : Tableau des résultats détaillés des ECR

Tableau 5.4-Résultats des études.

	Étude	Résultats	Commentaires
Paramètres biomécaniques	Gokeler & al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> -Angle de valgus du genou à l'IC, angle maximum de valgus du genou, temps à l'angle maximum de valgus du genou et amplitude de valgus : pas de différence significative entre FAI et FAE. -Flexion du genou à l'IC : pas de différence significative entre les groupes pour le côté non opéré. Côté opéré, la flexion du genou était significativement plus faible dans le groupe FAI. -Flexion maximale du genou : significativement plus faible dans le groupe FAI pour le côté non opéré et le côté opéré par rapport à la FAE. -Le temps nécessaire au groupe FAI pour atteindre la flexion maximale du genou était significativement plus court pour le côté non opéré et pour le côté opéré par rapport au groupe FAE. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de groupe contrôle. -Effet à court terme seulement (pas de suivi). -Faible taille d'échantillon (n=16) : faible crédibilité statistique. -Pas de test de transfert sur la pratique sportive.
	Ghaderi & al. (2021)	<ul style="list-style-type: none"> -Le groupe expérimental a augmenté ses angles maximums de flexion de genou, de hanche et du tronc lors de l'atterrissage par rapport au début de l'intervention. -Le groupe expérimental a diminué le pic d'abduction du genou, les angles de rotation interne du genou, le moment d'extension maximal du genou et le moment d'abduction maximal du genou, la force de cisaillement tibiale antérieure maximale, ainsi que la force de réaction verticale au sol. -Aucun changement n'a été observé pour le groupe contrôle. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible taille d'échantillon (n=24). -Pas de test de transfert. -Participants exclusivement masculins (résultats non généralisables à une autre population) -Pas de groupe expérimental FAI : difficile de conclure sur l'origine des résultats (entraînement neuromusculaire ou FAE ou les deux ?)
Contrôle postural	Ahmadi & al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> -La condition CCT a réduit la zone d'oscillation du COP par rapport aux conditions contrôle et FAE pour le groupe ACLR. -La SD du COP dans le groupe ACLR, dans les directions AP et ML est diminuée dans la condition CCT, tandis que les conditions FAE et contrôle ne montrent pas de différence. -Le groupe ACLR a une SD du COP supérieure au groupe sain dans la direction ML en condition contrôle tandis qu'il a une SD de COP inférieure à ce groupe dans la direction AP dans la condition CCT. -La condition CCT réduit la vitesse moyenne du COP par rapport aux conditions 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible taille d'échantillon (n=40). -Condition contrôle : nous ne savons pas sur quoi les participants se sont concentrés. -effet à court terme seulement (pas de suivi). -Pas de test de transfert. -Participants exclusivement masculins et footballeurs (résultats non

		<p>contrôle et FAE.</p> <ul style="list-style-type: none"> -La condition CCT augmente la fréquence moyenne de puissance (MPF) du COP par rapport aux conditions contrôle et FAE. -Les conditions n'ont pas d'impact sur les variables du contrôle postural pour le groupe sain. → La FAE est moins efficace que la CCT pour améliorer le contrôle postural dans cette étude. 	<p>généralisables à une autre population).</p> <ul style="list-style-type: none"> -FAE par feedback visuel.
--	--	---	--

IC : contact initial / CCT : tâche cognitive continue / COP : centre de pression / SD : déviation standard / AP : antéro-postérieure / ML : médio-latérale / MPF : fréquence moyenne de puissance

5.3.1 Effet du FAE sur les paramètres biomécaniques

Dans leur ECR, Gokeler et al. retrouvent des différences au niveau cinématique (*étude du mouvement/des corps sans considérer l'origine de ce mouvement*) entre les groupes FAI et FAE. Du côté du membre opéré, la flexion du genou au contact initial (IC) est significativement plus faible dans le groupe FAI ($27,25^{\circ} \pm 11,09^{\circ}$) que dans le groupe FAE ($37,38^{\circ} \pm 6,44^{\circ}$). La flexion maximale du genou est également plus faible pour le groupe FAI, que ce soit du côté opéré ($51,75^{\circ} \pm 16,67^{\circ}$ vs. $69,54^{\circ} \pm 11,44^{\circ}$) que non-opéré ($51,63^{\circ} \pm 12,93^{\circ}$ vs. $69,26^{\circ} \pm 12,21^{\circ}$). De même, le groupe FAI met moins de temps pour atteindre son angle de flexion maximale comparativement au groupe FAE côté opéré ($0,16s \pm 0,05s$ vs. $0,21s \pm 0,03s$) et non-opéré ($0,16s \pm 0,03s$ vs. $0,21s \pm 0,04s$). Contrairement à ces résultats, aucune différence significative n'a été mesurée entre les groupes concernant l'angle du valgus à l'IC, l'angle maximum du valgus, l'amplitude du valgus et le temps à l'angle maximum du valgus.

Ghaderi et al. ont mis en évidence des différences entre leurs groupes que ce soit au niveau cinématique ou cinétique (*étude des mouvements sous l'influence de forces, en prenant en compte l'origine du mouvement*). Suite à l'intervention de huit semaines, les angles maximaux de flexion du genou, de la hanche et du tronc lors de l'atterrissage ont vu leurs valeurs augmenter dans le groupe expérimental (respectivement +108,59%, +58,37% et +43,21%). Au contraire, les angles de pic d'abduction du genou et de rotation interne du genou ont diminué (-29,64% et -19,86%), tout comme les moments d'extension maximale et d'abduction maximale du genou (-22,85% et -37,5%). Nous retrouvons de la même manière dans ce groupe une réduction de la force de réaction verticale au sol (-34,21%) et de la force maximale de cisaillement antérieur du tibia (-12,5%). Le groupe contrôle n'a vu aucun changement apparaître dans les mesures après les huit semaines durant lesquelles les athlètes ont continué leurs activités habituelles.

5.3.2 Effet du FAE sur le contrôle postural

Selon Ahmadi et al., il n'y a pas de différence entre la FAE et la condition contrôle en ce qui concerne la stabilité posturale dans le groupe post reconstruction chirurgicale, comparativement à la condition d'ajout d'une tâche cognitive continue. En effet, la zone d'oscillation du centre de pression, sa déviation standard dans les directions AP et ML et sa

vitesse moyenne sont diminuées dans la condition CCT alors qu'aucune différence significative n'est constatée dans les conditions FAE et contrôle. Il en est de même pour la fréquence moyenne de puissance (MPF) du COP. Il n'y a pas de différence pour les conditions FAE et contrôle, mais la condition CCT a elle augmenté le MPF du centre de pression. Par ailleurs, aucune condition n'a d'influence sur la stabilité posturale dans le groupe sain.

6 Discussion

6.1 Limites et biais méthodologiques

6.1.1 Indicateurs bibliométriques

Les indicateurs bibliométriques nous permettent d'identifier si les sources de publications de nos articles sont de bonne qualité scientifique et d'évaluer si elles sont liées au domaine de recherche nous intéressant pour notre revue. *SCImago Journal Rank* (SJR), est un outil qui analyse les taux de citation des revues et permet de les évaluer par comparaison (98). Ici, nous utilisons les deux critères bibliométriques suivants pour analyser des revues :

- L'indicateur SJR : le SJR d'une revue est le nombre de fois où un article de cette revue est cité par d'autres articles pendant les 3 ans qui suivent sa publication, chaque citation reçue étant pondérée par la notoriété de la revue citante (99). Les revues sont classées en fonction de quartiles. Q1 comprend le quart des revues ayant les valeurs les plus élevées, Q2 les deuxièmes valeurs les plus élevées, Q3 les troisièmes valeurs les plus élevées et Q4 les valeurs les plus faibles.
- L'index H : il exprime le nombre d'articles de la revue (h) qui ont reçu au moins « h » citations. Il quantifie à la fois la productivité scientifique et l'impact scientifique des revues et s'applique également aux scientifiques, aux pays, etc.(99). Cet indicateur varie grandement en fonction des domaines d'intérêts, il doit donc être utilisé pour comparer des domaines d'intérêts similaires et/ou proches.

Le Tableau 6.1- *Analyse bibliométrique des sources de publication des articles sélectionnés dans la revue*. reprend l'évaluation bibliométrique réalisée.

Tableau 6.1- Analyse bibliométrique des sources de publication des articles sélectionnés dans la revue.

Article	Lieu de publication	Domaines d'intérêt	Indicateur SJR 2021	Index H
Gokeler & al. (2015)	Physical Therapy in Sport.	-Physiothérapie, thérapie du sport et réadaptation. -Sciences du sport. -Médecine. -Orthopédie et médecine du sport.	-Q1 -Q2 -Q2 -Q2	50
Ghaderi & al. (2021)	BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	-Physiothérapie, thérapie sportive et réadaptation. -Orthopédie et médecine du sport. -Réadaptation.	-Q2 -Q2 -Q2	27
Ahmadi & al (2020)	Neuroscience Letters	-Neurosciences.	-Q2	177

Les revues dans lesquelles ont été publiés les articles inclus dans notre RS ont globalement un indicateur SJR de bonne notoriété car ils sont majoritairement situés dans le second quartile pour leurs domaines d'intérêt. Seul le journal « Physical Therapy in Sport » à un indicateur SJR Q1 dans le domaine Physiothérapie, thérapie du sport et réadaptation.

Concernant le classement selon l'index H par catégorie, le journal « Neuroscience Letters » figure dans une bonne position en se situant 22^{ème} sur 145 journaux dans le domaine des neurosciences. Dans le champ « Physiothérapie, thérapie sportive et réadaptation », la revue « Physical Therapy in Sport » arrive 54^{ème} sur 225, ce qui est également bien. Pour « BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation », elle est 90^{ème} sur 225 dans le même champ, ce qui reste correct compte tenu du nombre important de revues existantes dans ce domaine.

6.1.2 Biais et limites méthodologiques de la revue de littérature

Premièrement, nous avons limité nos recherches dans les bases de données PEDro, Pubmed et ScienceDirect, spécifiquement choisies pour leurs contenus. Cependant, il existe possiblement d'autres études correspondantes à notre recherche n'étant pas indexées dans les bases de données sélectionnées. Nous avons tout de même utilisé au moins deux sources,

ce qui est recommandé selon la HAS et la grille ASMTAR d'évaluation de la qualité méthodologique des RS (100).

Les étapes de sélection des études et d'extraction des données ont été réalisées par une seule personne, tandis qu'il est recommandé que deux personnes, de façon indépendante, effectuent ces opérations. Cette limite augmente la subjectivité méthodologique en se basant sur l'avis d'un seul opérateur. Cette subjectivité individuelle s'exporte de la même manière à l'évaluation méthodologique des articles, réalisée elle aussi par une seule personne (100).

Enfin, nous avons rencontré un silence documentaire lors de nos requêtes initiales, défini comme « l'ensemble des documents pertinents non-affichés lors d'une recherche documentaire »(101). Cette difficulté nous a obligés à modifier et élargir nos équations de recherche ainsi que nos mots clés. Malgré ces modifications, il persiste un nombre peu élevé de résultats en fonction des bases de recherches, pouvant être expliqué entre autres par le caractère récent de la thématique choisie. En effet, si nous regardons le graphique Pubmed des résultats par année pour notre équation de recherche (Figure 5.1), nous pouvons observer que la majorité des articles ont été publiés à partir de 2014 jusqu'à aujourd'hui.

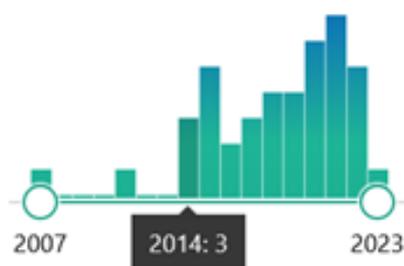


Figure 5.1-Résultats par année de l'équation de recherche utilisée sur Pubmed

Cet écueil nous a amené à choisir seulement 3 études pour notre revue de littérature, ce qui est relativement faible pour pouvoir comparer et avoir une interprétation généralisée des résultats.

6.1.3 Biais et limites méthodologiques des études incluses

Nous pouvons citer comme limite celui de la sélection des études incluses. Étant de types différents (ECR et étude cas-témoin), elles ont des méthodologies et niveaux de preuve différents. D'après le *Centre for Evidence-Based Medicine* (CEBM) d'Oxford, les ECR sont classées au niveau 2 sur 5 et les études observationnelles se situent au niveau 3 sur 5 dans

l'onglet prévention/thérapeutique (102). Nous ne pouvons pas comparer au même titre ces deux types d'études, et nous devons également prendre en compte ce critère pour nuancer le poids des résultats obtenus.

Un autre biais à évoquer est celui de suivi. Nous le retrouvons dans l'étude de Ghaderi et al. Ce biais est lié à une différence de prise en charge (de suivi) entre les groupes. Seul le facteur étudié (ici la FAE) doit varier entre les groupes. Or, dans son expérimentation, il inclut un programme d'ENM en plus de l'ajout de la FAE. Il est alors difficile de faire la part des choses dans l'origine des résultats. S'ils sont dus à l'entraînement neuromusculaire ou à la FAE ou aux deux. Il aurait été intéressant d'avoir un groupe supplémentaire combinant ENM et FAI pour jauger l'apport de la FAE.

Le principe de double aveugle n'est, lui non plus, pas respecté dans les études, ce qui augmente le risque de perte de comparabilité des groupes au cours du suivi et le risque de biais de performance. Ce dernier est relatif à la prise en charge différenciée des patients selon le traitement attribué pouvant aboutir à une modification du résultat du critère de jugement principal (103).

L'absence de groupe contrôle dans l'étude de Gokeler et al. ne permet pas une comparaison directe de l'évolution de patients où le seul élément contextuel différent est le traitement administré (103). En comparant deux groupes, l'un avec FAI, l'autre avec FAE, nous ne pouvons pas affirmer avec certitude que les différences constatées dans cette étude sont dues aux différents centres d'attention n'ayant pas de groupe contrôle comme référence.

Dans l'étude observationnelle d'Ahmadi et al., nous relevons également une limite quant à la définition de la condition contrôle. En effet, nous ne savons pas sur quoi les participants se concentrent pendant celle-ci, ce qui peut jouer sur l'efficacité de l'expérimentation.

Pour terminer, les ECR ont des scores PEDRO supérieurs ou égaux à 7/10 montrant une qualité méthodologique bonne, alors que l'étude observationnelle ne valide que 4 critères sur 9 selon l'échelle Newcastle-Ottawa, lui conférant une faible qualité méthodologique. Cependant, nous avons tout de même décidé de l'inclure dans notre revue du fait qu'elle soit la seule que nous ayons trouvée qui correspondait aux critères PICO pour l'évaluation du contrôle postural dans la population considérée.

Ainsi, à la vue de l'ensemble de ces biais et critères de jugement qualitatifs, la validité interne de notre revue, à savoir le degré de confiance que nous pouvons avoir vis-à-vis des résultats de ces expérimentations, semble assez limitée.

6.1.4 Validité externe des études incluses

La validité externe d'une expérience scientifique désigne la capacité de ses conclusions à être généralisées à des contextes non-expérimentaux aux patients du quotidien de la population ciblée (104).

Différents critères peuvent permettre de l'évaluer comme par exemple la taille d'effet correspondant à la force des résultats en situation clinique. Elle est présente dans les deux ECR inclus, avec l'utilisation du *d* de Cohen. Un *d* autour de 0,2 est décrit comme un effet faible, entre 0,5 et 0,8 comme moyen et supérieur à 0,8 comme important. La taille d'effet des valeurs significatives est grande dans l'étude de Gokeler et al., tandis qu'elle est modérée dans celle de Ghaderi et al. Ahmadi et al. n'ont pas précisé de mesure de taille d'effet permettant de juger la validité externe de leur étude.

Il existe d'autres indicateurs à prendre en compte pour évaluer la validité externe. Nous pouvons citer la taille de l'échantillon, qui est faible dans toutes les études incluses ($n=16$, $n=24$ et $n=40$), ce qui renvoie à une faible puissance statistique. À cela s'ajoute la courte durée de suivi dans les études d'Ahmadi et al. et de Ghaderi et al., effectuant une évaluation immédiate de leurs participants. Pour ces études, la population est exclusivement masculine, ce qui ne permet pas de généraliser à la population féminine. Aucune expérimentation n'a réalisé de test de rétention/transfert des compétences acquises vers la pratique sportive des participants, que ce soit de façon proche ou éloignée de l'intervention clinique. Liées à cette observation, les évaluations ont été menées sur des mouvements relativement simples (saut unipodal, réception de saut, équilibre unipodal) dans un environnement sécuritaire, loin de la complexité des enchaînements moteurs demandés lors de la pratique sportive étudiée et de son environnement incertain.

Ainsi, en rassemblant tous ces critères, nous sommes conscients que la validité externe des résultats obtenus dans ces études est faible.

6.2 Analyse et interprétation des résultats

Les résultats de ces études mettent en avant que la FAE lors d'exercice entraîne des changements dans la biomécanique du membre inférieur chez des personnes ayant été opérées du LCA. Au contraire, le contrôle postural n'est apparemment pas sensible à ce type de focalisation. Nous allons revenir sur ces conclusions au travers de notre discussion.

6.2.1 La FAE semble améliorer la biomécanique d'atterrissage post ACLR

Les deux ECR concluent qu'un entraînement avec FAE entraîne une biomécanique segmentaire plus sécuritaire lors d'une tâche d'atterrissage chez les participants ACLR. La flexion du genou est significativement plus importante dans les groupes FAE, tout comme les flexions de hanche et du tronc. Au contraire, l'abduction et la rotation interne du genou est significativement diminuée. Or, nous savons que la réduction de la flexion de la hanche et du genou et l'augmentation de l'abduction et de la rotation interne du genou peuvent conjointement accroître le risque de lésion du LCA (21,26,34). Ces résultats indiquent que le groupe FAE a utilisé une stratégie d'atterrissage moins rigide que les groupes FAI ou contrôle, ce qui peut diminuer le risque de lésion du LCA.

Ajouter à cela, les participants ayant bénéficié d'un ENM avec FAE ont, consécutivement à l'intervention, diminué leur force de réaction verticale au sol (vGRF) lors de l'atterrissage ainsi que la force de cisaillement antérieure du tibia. Ces réductions significatives de forces diminueraient la tension mise sur le LCA, et par conséquent le risque de lésion (108).

Cependant, dans l'étude de Ghaderi, ces résultats sont issus d'un programme d'ENM combiné avec la FAE, et non de la FAE seule. Nous ne pouvons pas dissocier ces deux variables, qui sont à considérer ensemble du fait du manque de comparaison avec un groupe ayant une focalisation attentionnelle différente. Il a été démontré que l'ENM atténue les facteurs de risque biomécaniques associés aux lésions du LCA, tout comme l'utilisation de la FAE (7,107).

6.2.2 Contrôle postural et FAE, une efficacité discutée

Les résultats de cette revue suggèrent qu'il n'y a pas suffisamment de preuve pour déterminer l'efficacité de la FAE sur le contrôle postural chez les patients post ACLR. La seule

étude incluse possède une faible qualité méthodologique ne nous permettant pas de nous fier intégralement à ces conclusions.

Dans la littérature, peu d'arguments sont apportés quant à l'utilisation de la FAE pour améliorer le contrôle postural suite à des troubles musculosquelettiques. Quelques recherches ont été faites sur les entorses de cheville, notamment dans les études de Laufer et al. (2007) et de Rotem-Lehrer et al. (2007) (108,109). Ils suggèrent qu'il existe des preuves limitées montrant que la FAE pourrait être supérieure à la FAI lors de l'apprentissage moteur de la stabilité posturale chez les participants ayant eu une entorse de cheville. Des améliorations du contrôle postural sur des surfaces modérément instables ainsi qu'une meilleure performance dans les phases d'acquisition et de rétention de l'apprentissage moteur ont été observées dans les groupes où la FAE a été utilisée (108,109). Cependant, ces études font état d'effets à court terme (quelques jours), sans suivi à long terme des participants. Ce fait peut s'avérer problématique dans le cas de l'ACLR du fait que la durée moyenne de la rééducation pour un patient est d'environ neuf mois en fonction des objectifs visés, et que des déficits de contrôle postural persistent des années après la lésion (74,110). Bien qu'il existe de nombreuses preuves de l'effet de la focalisation attentionnelle sur plusieurs aspects de l'apprentissage moteur, peu d'évaluations ont été faites sur des sujets déficients. Notamment, la phase de « transfert » des améliorations du contrôle postural vers l'activité n'a pas montré des résultats significatifs après une lésion musculosquelettique dans la littérature.

L'importance de la focalisation attentionnelle et son effet sur le contrôle postural à long terme devraient être déterminés par des recherches futures avec un suivi allongé et des tests de transferts sur la pratique sportive.

6.3 La FAE, un outil parmi d'autres pour soutenir la neuroplasticité post-lésionnelle et optimiser l'apprentissage moteur en rééducation

6.3.1 Répondérer l'information sensorielle par la perturbation visuelle

Nous savons que l'intégration des informations sensorielles est perturbée après une lésion du LCA consécutivement à la diminution et l'intégration déficitaire des afférences sensorielles et notamment proprioceptives (75,76). Les individus se retrouvent alors « visuo-dépendants », privilégiant l'entrée visuelle aux entrées proprioceptive et vestibulaire (8,111).

En résulte des modifications dans le traitement du SNC des interactions entre la vision et les capacités somato-sensorielles induisant une cascade de neuroplasticité contribuant à la dépendance du feedback visuel pour assurer le contrôle neuromusculaire (Figure 6.2) (51).

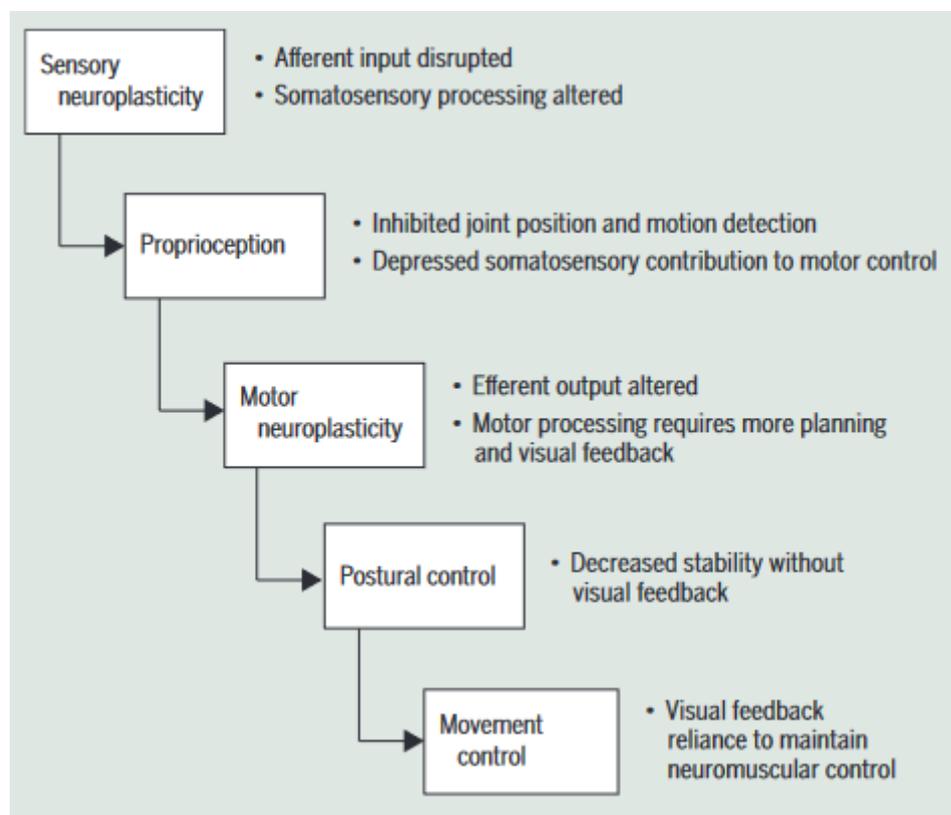


Figure 6.2- Schéma des adaptations neurologiques après une lésion du LCA ; une cascade de neuroplasticité contribuant à la dépendance visuelle pour maintenir le contrôle neuromusculaire (Grooms et al. 2015).

Cette préférence visuelle, au dépend notamment des informations proprioceptives, conduit à une régression des capacités de contrôle postural lors des situations sportives complexes. Lors de ses situations, la vision est principalement utilisée pour gérer l'environnement extérieur, et la gestion du contrôle postural est alors dirigée essentiellement grâce aux signaux proprioceptifs reçus (36,51). Plus les contraintes entourant le patient augmentent, plus le recours aux informations visuelles doit être limité afin d'optimiser la stratégie posturale (112,113). Retrouver l'équilibre dans l'utilisation des entrées sensorielles devient alors un objectif crucial pour retrouver une stratégie de contrôle postural et de stabilité articulaire la plus efficace pour nos patients.

De ces évidences, de nouvelles techniques rééducatives ont vu le jour, ayant pour objectif de limiter l'utilisation de l'entrée visuelle au profit des autres entrées sensorielles. C'est le cas de l'entraînement avec perturbation visuelle qui vise à réduire la disponibilité de l'entrée visuelle

pendant les exercices de rééducation standard, afin de réduire la dépendance à l'égard de la vision et réorienter le traitement neuronal vers la proprioception et/ou augmenter l'efficacité du traitement visuo-moteur (51). L'objectif principal est d'améliorer le transfert vers l'activité, en reproduisant plus fidèlement les exigences neurocognitives inhérentes à la fonction sportive. Différentes méthodes peuvent être utilisées ; l'obstruction visuelle complète (yeux fermés, bandeau), davantage utilisée lors de tâches d'équilibre statique, de proprioception ou de mouvements simples (114–116), et l'obstruction visuelle partielle pouvant être combinée à des exercices plus dynamiques. Cette dernière permet un entraînement neuromusculaire plus fonctionnel et une compensation des séquelles neuroplastiques liées à la lésion du LCA. Les lunettes stroboscopiques, qui ont la capacité d'obstruer partiellement la vision en alternant du clair à l'opaque, offrent cette capacité de travail

Figure 6.3) (117,118).

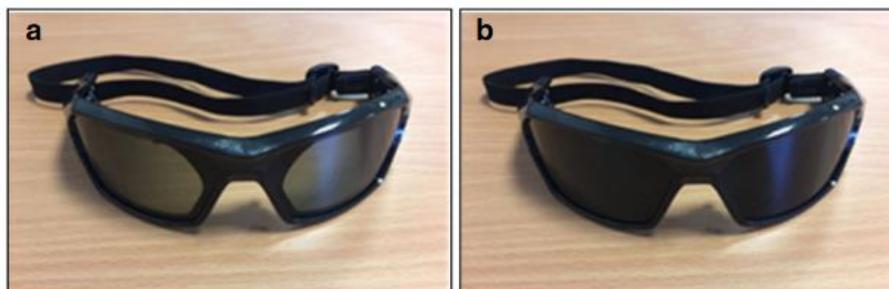


Figure 6.3 - Lunettes stroboscopiques avec des verres clairs (a) ou opaques (b)(Wilkins et al. 2018).

Il a été démontré que l'utilisation de ce dispositif améliore les aptitudes comme l'anticipation de la trajectoire, la mémoire à court terme, la vitesse de traitement de l'information ou encore l'attention divisée (117,119,120). D'autres techniques visant à modifier le retour visuel en dehors des lunettes stroboscopiques peuvent être plus accessibles et permettre d'encourager la neuroplasticité adaptative, telle que la double tâche utilisant l'interaction environnementale (51).

Les travaux de Gokeler et al., ont mis en avant des concepts tels que les apprentissages implicite, différentiel, autocontrôlé ou encore l'interférence contextuelle, pouvant être utilisés en rééducation pour soutenir l'apprentissage moteur (6).

6.3.2 L'apprentissage implicite

L'apprentissage implicite a pour objectif de minimiser la quantité d'informations déclaratives (explicites) sur l'exécution d'un mouvement lors de son apprentissage (6). Il peut être induit en fournissant des analogies à la place d'instructions explicites, afin d'aider le patient à « ressentir » le mouvement en l'associant à une image visuelle. L'apprentissage implicite réduit la dépendance à l'égard de la mémoire de travail et favorise un processus plus automatique, améliorant alors les capacités d'anticipation des athlètes (121,122). Cette technique rééducative influence la fonction cortico-spinale, altérée après l'ACLR, et améliore le contrôle neuromusculaire du genou pouvant présenter des défaillances persistantes après un traumatisme du LCA (123,124).

Pour illustrer un exercice expliqué avec instructions implicites ou explicites, nous pouvons prendre l'exemple du squat. En instructions explicites, nous pouvons donner la consigne suivante : « descendez de manière à ce que vos cuisses soient aussi parallèles que possible au sol, les genoux passant au-dessus des chevilles » tandis qu'en instructions implicites cela donnerait : « imaginez que vous ramassez une lourde boîte sur le sol »(6).

6.3.3 L'apprentissage différentiel

Ce principe suggère qu'en demandant aux patients d'exécuter une variété de schémas de mouvement, un processus d'apprentissage auto-organisé est initié (125). En expérimentant plusieurs modèles de mouvement, les patients apprennent une solution individualisée qui correspond au mieux à leurs caractéristiques, en fonction de leur contexte environnemental et de leurs contraintes corporelles personnelles (126). Une étude récente, analysant l'activité EEG de joueurs de badminton dans le cadre d'un apprentissage différentiel, a montré une amélioration de l'apprentissage moteur par une accentuation de la trace mnésique somatosensorielle du mouvement réalisé. Cette trace, plus stable face aux perturbations internes et externes, permet un traitement plus efficient de l'information. En découle une utilisation plus adaptée des ressources attentionnelles, accordant à l'athlète de meilleures

facultés d'anticipation notamment utiles dans des situations contextuelles complexes à haut risque de blessures (127).

6.3.4 L'apprentissage autocontrôlé

En général, lors des séances de rééducation, le kinésithérapeute décide des exercices que le patient doit réaliser et des différents détails qui y sont liés (ordre, durée, retour d'information, démonstration, etc.). Le patient est alors dans un rôle à majorité passif, appliquant les demandes qui lui sont prescrites. L'apprentissage autocontrôlé renvoie à la prise en main par le patient des conditions de pratique. Il est par exemple possible de proposer au patient de choisir les exercices qu'il peut réaliser pendant la séance de rééducation, parmi une liste proposée correspondants à ses objectifs. Ce type d'apprentissage renvoie également à la possibilité de décider du moment où un retour d'information est accordé. Il a été démontré que laisser les apprenants décider après quel essai ils veulent, ou ne veulent pas, recevoir un retour d'information conduit à un apprentissage plus efficace que les programmes de retour d'information prédéterminés (128). Chiviacowsky et al. (2002), ont mis en avant que la majorité des individus demandent un feedback après les bons essais, préférant recevoir un retour positif, les motivant davantage (129).

L'apprentissage moteur, fortement influencé par les processus motivationnels comme l'intérêt ou encore le plaisir, se voit améliorer par l'utilisation de l'apprentissage autocontrôlé (130). Cette modalité d'apprentissage peut aider nos patients à s'appliquer davantage dans leur longue période de rééducation qui peut s'avérer difficile à vivre et où la motivation peut progressivement décliner.

6.3.5 L'interférence contextuelle

Elle est définie comme « l'effet sur l'apprentissage du degré d'interférence fonctionnelle constaté dans une situation d'entraînement lorsque l'on pratique une tâche dans le contexte d'autres tâches » (131). Le degré d'interférences varie qu'on soit dans une pratique bloquée (peu de variations dans l'entraînement), en série (une série de tâches préétablies est répétée et pratiquée) ou aléatoire (plusieurs compétences dans un ordre aléatoire lors d'une session d'entraînement). Cette dernière modalité, qui met l'apprenant en difficulté pendant l'entraînement, semble être la plus efficace pour la rétention et le transfert des compétences motrices acquises vers l'activité sportive (Figure 6.4) (131,132). Cependant,

en rééducation, il semble important d'évaluer les compétences de nos patients afin de déterminer la quantité d'interférences pouvant lui être soumise pour ne pas le mettre systématiquement dans une situation d'échec, pouvant impacter sa motivation. Il faut trouver le bon dosage, et l'exposer graduellement à des sollicitations dont le degré d'interférences augmente en fonction de l'amélioration de ses aptitudes. Au niveau cortical, l'exercice avec interférences aléatoires augmente l'activité dans les aires sensorimotrices et prémotrices par rapport à la pratique avec interférences bloquées (132). L'activité corticale de ces aires étant impactée avec le traumatisme, l'interférence contextuelle paraît alors être un outil intéressant pour supporter et optimiser la neuroplasticité adaptative (8,52).

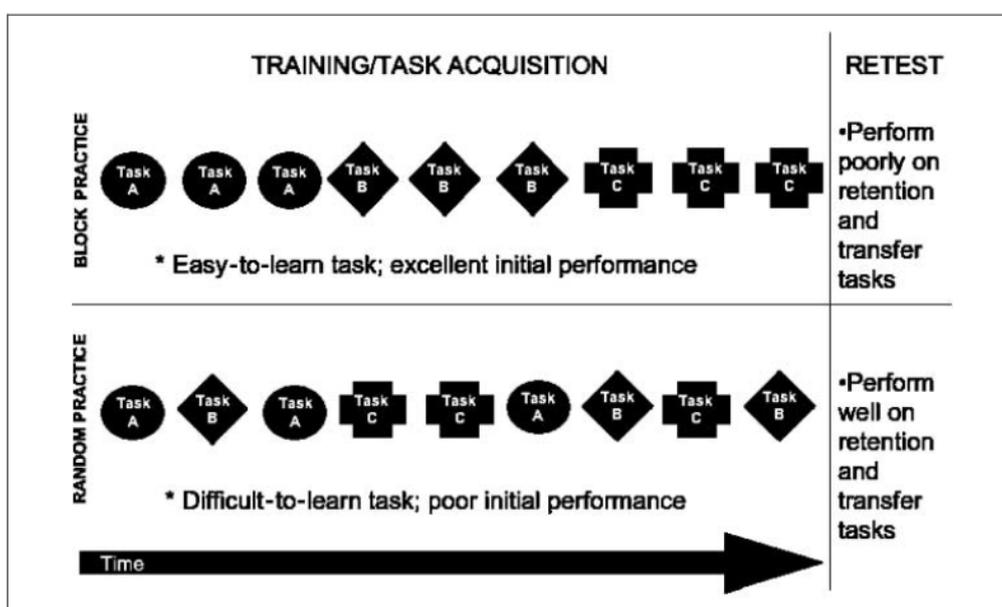


Figure 6.4 - Schéma de l'interférence contextuelle et de ses effets sur l'apprentissage moteur (Cross et al., 2007)

6.4 Des résultats intéressants en rééducation neurologique

En rééducation musculosquelettique, l'utilisation des techniques rééducatives ci-dessus mentionnées n'est pas largement répandue et les recherches de leur efficacité dans ce type de prise en charge sont encore assez récentes. En neurologie, les recherches sont un peu plus avancées et la mise en place de ces techniques a mis en évidence des résultats prometteurs. Landers et al., en 2005, ont montré que l'utilisation d'un focus attentionnel externe chez des patients Parkinsoniens chuteurs permettait de réduire l'oscillation posturale, en comparaison à un focus interne ou à l'absence d'instruction (133). En juin 2022, la HAS recommande également d'utiliser la FAE dans la rééducation de la phase chronique suivant un AVC (accident

vasculaire cérébral), pour améliorer la fonction motrice du membre inférieur, la stabilité et la capacité de marche (134). L'apprentissage autocontrôlé, chez des patients Parkinsoniens, augmente le temps maintenu en position d'équilibre, renforce la motivation et réduit l'inquiétude ressentie face aux mouvements (135). Au contraire, concernant l'interférence contextuelle, il semble que la pratique bloquée soit plus bénéfique que la pratique aléatoire dans les performances d'apprentissage moteur chez les patients atteints de maladie d'Alzheimer ou de maladie de Parkinson (136,137).

Il est intéressant d'observer ce qui se fait dans d'autres champs de pratique. Au regard de ces résultats, il serait pertinent d'étoffer les recherches sur les effets de ces techniques dans des pathologies fréquemment rencontrées dans le domaine musculosquelettique afin de se rapprocher au mieux de notre contexte clinique.

6.5 La chirurgie reconstructrice du LCA : un traumatisme supplémentaire ?

Dans notre revue, nous ciblons des individus qui ont bénéficié d'une reconstruction chirurgicale suite à leur blessure. Il est intéressant à savoir que, la chirurgie elle-même, par son atteinte tissulaire majeure (incision tissulaire et musculaire, forage osseux, prélèvement et fixation du greffon), provoque une atteinte neurologique non négligeable (138). Ces répercussions sont semblables à celles du traumatisme lésionnel initial, au niveau périphérique (atrophie musculaire) mais aussi central (inhibition neuronale descendante, excitabilité réduite du tractus corticospinal) (139,140). Une altération de l'activation volontaire du quadriceps ainsi qu'une diminution bilatérale du réflexe spinal sont également retrouvées en post-opératoire (57,139). Ces conséquences ne semblent toutefois pas avoir de lien avec le type de greffe utilisée (141).

Les techniques actuelles d'autogreffe ou d'allogreffe ne permettant pas de préserver les mécanorécepteurs résiduels ou de ré-innervé les afférences articulaires, des innovations chirurgicales sont étudiées, dans le but de minimiser l'atteinte neurophysiologique (142). Ces nouvelles techniques, comme la procédure de suture BEAR (*Bridge-Enhanced Cruciate Ligament Repair*) utilisant un échafaudage bioactif, pourraient permettre de rétablir la fonction sensorielle du genou, et de minimiser les effets neurophysiologiques inadaptés(143). Bien que ces avancées semblent prometteuses, elles nécessitent d'être davantage étudiées avant d'être généralisées. Selon la revue de littérature de Nwachukwu et al. (2019), les

techniques actuelles d'ACLR restent le Gold-Standard et apportent aujourd'hui les meilleures mesures des résultats de soins rapportés par le patient (144) .

6.6 Réponse à la question de recherche et aux hypothèses

La réponse à la question de recherche ainsi qu'à nos hypothèses se veut nuancée au vu du peu de littérature disponible sur le sujet et du faible nombre d'articles considérés dans cette revue. Nous pouvons dire que sur le versant biomécanique, la focalisation attentionnelle externe améliore le comportement moteur des sujets dans des tâches simples d'atterrissage mais n'a pas montré d'effets significatifs sur le contrôle postural chez des patients après ACLR. Les suivis réalisés se sont limités à quelques semaines tout au plus, ne permettant pas de conclure sur le maintien dans le temps de ces améliorations de comportement moteur. De la même façon, ces expérimentations ont été menées sur des mouvements sans réelle complexité ne se rapprochant pas de la fonction sportive, n'incluant pas la mise en place de tests de transferts.

Toutefois, il est établi que les instructions avec FAE permettent d'améliorer les performances motrices, de restaurer la qualité du mouvement, et de soutenir la neuroplasticité post-lésionnelle (83,145). Malgré les preuves existantes aujourd'hui montrant les bénéfices de son utilisation par rapport à la FAI, il persiste que cette modalité est peu exploitée en rééducation (82).

Dans ce travail, seules les répercussions biomécaniques et posturales suite à l'utilisation de la FAE ont été étudiées. Considérant la rupture du LCA comme une blessure multidimensionnelle impliquant une réorganisation du SNC, il aurait été intéressant de se pencher sur les effets de la FAE sur l'ensemble des processus centraux sous-jacents. Cependant, peu de recherches ont été menées sur les mécanismes neurophysiologiques liés à la focalisation attentionnelle et à la manière dont la rééducation peut influencer sur ces adaptations centrales.

6.7 Perspectives professionnelles

En tant que future professionnelle de santé, ce travail nous a donné l'opportunité d'appréhender la démarche de recherche scientifique et particulièrement la lecture critique

d'articles. Notre profession, fondée sur *l'Evidence Based Practice* nécessite d'avoir un regard critique sur les données scientifiques pour les confronter à notre expérience clinique ainsi qu'aux caractéristiques personnelles du patient et de ses attentes. Ce travail d'initiation à la recherche a permis de faire un état des lieux des nouvelles connaissances et techniques thérapeutiques concernant la rééducation de la rupture du LCA, notamment celles impactant les performances et habiletés motrices.

En tant que kinésithérapeutes, l'acquisition motrice en vue de la restauration de la fonction est l'un de nos objectifs prioritaires, et nous devons trouver les moyens les plus adaptés et efficaces pour y parvenir. Il semble alors intéressant d'inclure dans nos stratégies rééducatives les techniques permettant de soutenir l'apprentissage moteur, dont fait partie la FAE. Elle doit être intégrée dans une rééducation qualitative et réfléchie, adaptée à chaque patient en fonction de ses objectifs et de ses caractéristiques individuelles.

Des résultats prometteurs ont été mis en avant en rééducation neurologique concernant les autres techniques favorisant l'apprentissage moteur, mais n'ont pas été largement étudiées dans le champ musculosquelettique. Même si nous essayons d'avoir une pratique professionnelle la plus *Evidence-Based Practice* possible, nous ne pouvons tout le temps attendre que la recherche scientifique nous apporte des preuves dans un contexte précis pour soigner notre patient. Nous pouvons alors observer ce qui se fait ailleurs, pouvant répondre aux problématiques rencontrées dans nos prises en charge, tout en gardant un esprit critique.

Personnellement, ce travail nous a permis d'approfondir des connaissances sur une pathologie fréquemment rencontrée, mais qui est finalement plus complexe que ce que nous pouvions initialement le penser. Nous ne connaissons pas tous les aspects inhérents aux adaptations du SNC liés à la rééducation, mais nous savons qu'elle peut avoir un impact majeur sur la neuroplasticité après une lésion du LCA.

7 Conclusion

L'amélioration de la performance motrice, reflet de l'apprentissage moteur, est un objectif primordial visé au travers de toute rééducation dans le domaine musculosquelettique. Nous l'avons vu, le système nerveux central, de par sa plasticité neuronale, est étroitement

lié à l'acquisition des aptitudes motrices. De récentes recherches mettent en évidence la cascade d'altérations centrales induite consécutivement à la blessure, et le rôle que nous avons en tant que rééducateurs pour optimiser la neuroplasticité post-lésionnelle. La focalisation attentionnelle externe fait partie des techniques utilisables en pratique clinique, améliorant la performance motrice et la qualité des mouvements. Même si certaines explications émergent, davantage de recherches sont nécessaires pour comprendre les processus neurophysiologiques sous-jacents et leur évolution tout au long de la prise en charge rééducative. De même, d'autres techniques optimisant l'apprentissage moteur ont été exposées, mais demandent d'être étudiées plus profondément pour comprendre leur fonctionnement. La perturbation visuelle semble également être un outil intéressant pour répondre à l'intégration déficitaire des informations sensorielles consécutivement à la blessure.

Pour autant, même si la littérature scientifique met en avant les bénéfices de ces techniques rééducatives, spécialement de la FAE, peu de kinésithérapeutes en font usage dans leur pratique quotidienne. Dans le futur, il serait pertinent de questionner la profession sur les barrières rencontrées pour sa mise en place, et de donner des pistes pour faciliter son utilisation.

Ce cheminement réflexif nous a amenés à considérer la lésion du LCA non pas uniquement comme une atteinte du système musculosquelettique périphérique, mais aussi comme ayant des répercussions centrales à part entière. Une approche multidimensionnelle et pluri professionnelle semble pertinente pour comprendre l'ensemble des mécanismes inhérents à cette blessure. L'expertise de cliniciens et chercheurs spécialisés dans les neurosciences pourraient être bénéfique pour comprendre l'impact des techniques thérapeutiques utilisées sur la neuroplasticité cérébrale, dans le cadre de la rééducation d'une blessure telle que la rupture du LCA.

Références bibliographiques

1. Contenu des bases PMSI MCO 2019 | Publication ATIH [Internet]. [cité 16 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.atih.sante.fr/contenu-des-bases-pmsi-mco-2019>
2. Moses B, Orchard J, Orchard J. Systematic Review: Annual Incidence of ACL Injury and Surgery in Various Populations. *Res Sports Med.* juill 2012;20(3-4):157-79.
3. 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.* août 2015;49(16):1033-41.
4. Mather RC, Koenig L, Kocher MS, Dall TM, Gallo P, Scott DJ, et al. Societal and Economic Impact of Anterior Cruciate Ligament Tears. *J Bone Joint Surg Am.* 2 oct 2013;95(19):1751-9.
5. Swanik CB, Covassin T, Stearne DJ, Schatz P. The Relationship between Neurocognitive Function and Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Am J Sports Med.* juin 2007;35(6):943-8.
6. 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.* juin 2019;49(6):853-65.
7. Wulf G. Attentional focus and motor learning: a review of 15 years. *Int Rev Sport Exerc Psychol.* 2013;6(1):77-104.
8. Grooms DR, Page SJ, Nichols-Larsen DS, Chaudhari AMW, White SE, Onate JA. Neuroplasticity Associated With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* mars 2017;47(3):180-9.
9. Baumeister J, Reinecke K, Schubert M, Weiß M. Altered electrocortical brain activity after ACL reconstruction during force control. *J Orthop Res.* 2011;29(9):1383-9.
10. Wulf G, Höß M, Prinz W. Instructions for Motor Learning: Differential Effects of Internal Versus External Focus of Attention. *J Mot Behav.* juin 1998;30(2):169-79.
11. Wulf G, McConnel N, Gärtner M, Schwarz A. Enhancing the Learning of Sport Skills Through External-Focus Feedback. *J Mot Behav.* juin 2002;34(2):171-82.
12. Wulf G, McNevin N, Shea CH. The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *Q J Exp Psychol Sect A.* nov 2001;54(4):1143-54.
13. Sturmborg C, Marquez J, Heneghan N, Snodgrass S, van Vliet P. Attentional focus of feedback and instructions in the treatment of musculoskeletal dysfunction: A systematic review. *Man Ther.* déc 2013;18(6):458-67.
14. Hughes G, Watkins J. A Risk-Factor Model for Anterior Cruciate Ligament Injury: *Sports Med.* 2006;36(5):411-28.

15. Corry I. Injuries of the sporting knee. *Br J Sports Med.* 1 oct 2000;34(5):395-395.
16. Kaeding CC, Léger-St-Jean B, Magnussen RA. Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clin Sports Med.* janv 2017;36(1):1-8.
17. Axelrod K, Canastra N, Lemme NJ, Testa EJ, Owens BD. Epidemiology With Video Analysis of Knee Injuries in the Women's National Basketball Association. *Orthop J Sports Med.* 1 sept 2022;10(9):232596712211208.
18. Chia L, De Oliveira Silva D, Whalan M, McKay MJ, Sullivan J, Fuller CW, et al. Non-contact Anterior Cruciate Ligament Injury Epidemiology in Team-Ball Sports: A Systematic Review with Meta-analysis by Sex, Age, Sport, Participation Level, and Exposure Type. *Sports Med.* oct 2022;52(10):2447-67.
19. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of Second ACL Injuries 2 Years After Primary ACL Reconstruction and Return to Sport. *Am J Sports Med.* juill 2014;42(7):1567-73.
20. 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.* mars 2012;22(2):116-21.
21. Acevedo RJ, Rivera-Vega A, Miranda G, Micheo W. Anterior Cruciate Ligament Injury: Identification of Risk Factors and Prevention Strategies. 2014;13(3).
22. 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.* nov 2010;38(11):2218-25.
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.* juin 2004;32(4):1002-12.
24. Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, Engebretsen L, Smith G, Slauterbeck JR, et al. Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury in Basketball: Video Analysis of 39 Cases. *Am J Sports Med.* mars 2007;35(3):359-67.
25. 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.* févr 2018;46(2):333-40.
26. 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.* nov 2021;30(4):1341-51.
27. Bittencourt NFN, Meeuwisse WH, Mendonça LD, Nettel-Aguirre A, Ocarino JM, Fonseca ST. Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor

- identification to injury pattern recognition—narrative review and new concept. *Br J Sports Med.* nov 2016;50(21):1309-14.
28. Pfeifer CE, Beattie PF, Sacko RS, Hand A. Risk factors associated with non-contact anterior cruciate ligament injury : a systematic review. *Int J Sports Phys Ther.* août 2018;13(4):575-87.
 29. Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Holme I, Bahr R. Relationship between floor type and risk of ACL injury in team handball: Relationship between floor type and risk of ACL. *Scand J Med Sci Sports.* oct 2003;13(5):299-304.
 30. Volpi P, Bisciotti GN, Chamari K, Cena E, Carimati G, Bragazzi NL. Risk factors of anterior cruciate ligament injury in football players: a systematic review of the literature. *Muscle Ligaments Tendons J.* févr 2016;06(04):480.
 31. Price MJ, Tuca M, Cordasco FA, Green DW. Nonmodifiable risk factors for anterior cruciate ligament injury. *Curr Opin Pediatr.* févr 2017;29(1):55-64.
 32. Griffin LY, Kercher J, Rossi N. Risk and Gender Factors for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury. In: *The Anterior Cruciate Ligament* [Internet]. Elsevier; 2018 [cité 28 janv 2023]. p. 19-26.e4. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323389624000059>
 33. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD. Effects of the Menstrual Cycle on Anterior Cruciate Ligament Injury Risk: A Systematic Review. *Am J Sports Med.* avr 2007;35(4):659-68.
 34. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes: A Prospective Study. *Am J Sports Med.* avr 2005;33(4):492-501.
 35. 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.* mai 2014;48(9):779-83.
 36. Swanik C "Buz". Brains and Sprains: The Brain's Role in Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. *J Athl Train.* 1 oct 2015;50(10):1100-2.
 37. Wilke J, Groneberg DA. Neurocognitive function and musculoskeletal injury risk in sports:A systematic review. *J Sci Med Sport.* janv 2022;25(1):41-5.
 38. Dufour M. Anatomie de l'appareil locomoteur - Tome 1 : Membres inférieurs. 2ème édition. Elsevier Masson; 2015.
 39. Domnick C, Raschke MJ, Herbort M. Biomechanics of the anterior cruciate ligament: Physiology, rupture and reconstruction techniques. 7(2):13.
 40. Noailles T, Pujol N, Beaufils P, Boisrenoult P. Anatomie en ruban du ligament croisé antérieur : la confirmation ! *Rev Chir Orthopédique Traumatol.* déc 2014;100(8):e28.

41. Boisrenoult P, Noailles T, Steltzen C, Beaufils P, Pujol N. Anatomie moderne du ligament croisé antérieur – un seul faisceau plat torsadé. *Rev Chir Orthopédique Traumatol.* nov 2015;101(7):S250-1.
42. Micheo W, Hernández L, Seda C. Evaluation, Management, Rehabilitation, and Prevention of Anterior Cruciate Ligament Injury: Current Concepts. *PM&R.* oct 2010;2(10):935-44.
43. Markatos K, Kaseta MK, Lалlos SN, Korres DS, Efstathopoulos N. The anatomy of the ACL and its importance in ACL reconstruction. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* oct 2013;23(7):747-52.
44. Zimny ML, Schutte M, Dabezies E. Mechanoreceptors in the human anterior cruciate ligament. *Anat Rec.* févr 1986;214(2):204-9.
45. Schultz RA, Miller DC, Kerr CS, Micheli L. Mechanoreceptors in human cruciate ligaments. A histological study. *J Bone Joint Surg Am.* sept 1984;66(7):1072-6.
46. Lamy JC. Bases neurophysiologiques de la proprioception. *Kinésithérapie Sci.* 2006;(472):15-23.
47. Wodowski AJ, Swigler CW, Liu H, Nord KM, Toy PC, Mihalko WM. Proprioception and Knee Arthroplasty : A Literature Review. *Orthop Clin North Am.* avr 2016;47(2):301-9.
48. Laboute E, Verhaeghe E, Puig PL, Blanquet X, Geneve T, Goudal B, et al. Spécificité et évaluation de la proprioception du genou. *J Traumatol Sport.* mars 2016;33(1):20-30.
49. Proske U, Gandevia SC. The Proprioceptive Senses: Their Roles in Signaling Body Shape, Body Position and Movement, and Muscle Force. *Physiol Rev.* oct 2012;92(4):1651-97.
50. Kaya D, Yertutanol FDK, Calik M. Neurophysiology and Assessment of the Proprioception. In: Kaya D, Yosmaoglu B, Doral MN, éditeurs. *Proprioception in Orthopaedics, Sports Medicine and Rehabilitation* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [cité 5 févr 2023]. p. 3-11. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-66640-2_1
51. Grooms D, Appelbaum G, Onate J. Neuroplasticity Following Anterior Cruciate Ligament Injury: A Framework for Visual-Motor Training Approaches in Rehabilitation. *J Orthop Sports Phys Ther.* mai 2015;45(5):381-93.
52. Kapreli E, Athanasopoulos S, Gliatis J, Papathanasiou M, Peeters R, Strimpakos N, et al. Anterior Cruciate Ligament Deficiency Causes Brain Plasticity: A Functional MRI Study. *Am J Sports Med.* déc 2009;37(12):2419-26.
53. Neto T, Sayer T, Theisen D, Mierau A. Functional Brain Plasticity Associated with ACL Injury: A Scoping Review of Current Evidence. *Neural Plast.* 27 déc 2019;2019:1-17.
54. 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 Multidiscip Approach. 8 juill 2021;194173812110292.

55. Dhillon MS, Bali K, Prabhakar S. Differences among mechanoreceptors in healthy and injured anterior cruciate ligaments and their clinical importance. juin 2012;6.
56. Sjölander P, Johansson H, Djupsjöbacka M. Spinal and supraspinal effects of activity in ligament afferents. J Electromyogr Kinesiol. juin 2002;12(3):167-76.
57. Lepley AS, Gribble PA, Thomas AC, Tevald MA, Sohn DH, Pietrosimone BG. Quadriceps neural alterations in anterior cruciate ligament reconstructed patients: A 6-month longitudinal investigation: ACLr neural alterations. Scand J Med Sci Sports. déc 2015;25(6):828-39.
58. Navarro X, Vivó M, Valero-Cabré A. Neural plasticity after peripheral nerve injury and regeneration. Prog Neurobiol. juill 2007;82(4):163-201.
59. Almonroeder TG, Kernozek T, Cobb S, Slavens B, Wang J, Huddleston W. Divided attention during cutting influences lower extremity mechanics in female athletes. Sports Biomech. 4 mai 2019;18(3):264-76.
60. Diamond A. The Early Development of Executive Functions. In: Bialystok E, Craik FIM, éditeurs. Lifespan Cognition: Mechanisms of Change [Internet]. Oxford University Press; 2006 [cité 6 févr 2023]. p. 0. Disponible sur: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195169539.003.0006>
61. Herman DC, Zaremski JL, Vincent HK, Vincent KR. Effect of Neurocognition and Concussion on Musculoskeletal Injury Risk. Curr Sports Med Rep. 2015;14(3):194-9.
62. Sharma N, Classen J, Cohen LG. Neural plasticity and its contribution to functional recovery. In: Handbook of Clinical Neurology [Internet]. Elsevier; 2013 [cité 5 févr 2023]. p. 3-12. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444529015000010>
63. Vezzani A, Viviani B. Neuromodulatory properties of inflammatory cytokines and their impact on neuronal excitability. Neuropharmacology. sept 2015;96:70-82.
64. Baumeister J, Reinecke K, Weiss M. Changed cortical activity after anterior cruciate ligament reconstruction in a joint position paradigm: an EEG study: ACL and cortical activity. Scand J Med Sci Sports. 7 déc 2007;18(4):473-84.
65. Valeriani M, Restuccia D, Lazzaro VD, Franceschi F, Fabbriani C, Tonali P. Central nervous system modifications in patients with lesion of the anterior cruciate ligament of the knee. Brain. 1996;119(5):1751-62.
66. Peterka RJ. Sensory integration for human balance control. In: Handbook of Clinical Neurology [Internet]. Elsevier; 2018 [cité 27 févr 2023]. p. 27-42. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444639165000021>

67. Riemann BL, Caggiano NA, Lephart SM. Examination of a Clinical method of Assessing Postural Control during a Functional Performance Task. *J Sport Rehabil.* août 1999;8(3):171-83.
68. Sekulic D, Spasic M, Mirkov D, Cavar M, Sattler T. Gender-Specific Influences of Balance, Speed, and Power on Agility Performance. *J Strength Cond Res.* mars 2013;27(3):802-11.
69. Zemková E, Zapletalová L. The Role of Neuromuscular Control of Postural and Core Stability in Functional Movement and Athlete Performance. *Front Physiol.* 24 févr 2022;13:796097.
70. Arockiaraj J, Korula RJ, Oommen AT, Devasahayam S, Wankhar S, Velkumar S, et al. Proprioceptive changes in the contralateral knee joint following anterior cruciate injury. *Bone Jt J.* févr 2013;95-B(2):188-91.
71. Howells BE, Ardern CL, Webster KE. Is postural control restored following anterior cruciate ligament reconstruction? A systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* juill 2011;19(7):1168-77.
72. 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.* déc 2017;3(1):32.
73. Lehmann T, Büchel D, Mouton C, Gokeler A, Seil R, Baumeister J. Functional Cortical Connectivity Related to Postural Control in Patients Six Weeks After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Front Hum Neurosci.* 15 juill 2021;15:655116.
74. 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.* mai 2016;46:98-103.
75. Latash M, éditeur. There Is No Motor Redundancy in Human Movements. There Is Motor Abundance. *Motor Control.* juill 2000;4(3):259-61.
76. Latash ML. The bliss (not the problem) of motor abundance (not redundancy). *Exp Brain Res.* mars 2012;217(1):1-5.
77. Kolb B, Gibb R. Principles of neuroplasticity and behavior. In: Stuss DT, Winocur G, Robertson IH, éditeurs. *Cognitive Neurorehabilitation* [Internet]. 2^e éd. Cambridge University Press; 2008 [cité 7 févr 2023]. p. 6-21. Disponible sur: https://www.cambridge.org/core/product/identifiser/9781316529898%23c87133-26/type/book_part
78. Schmidt RA, Lee TD. *Motor control and learning: A behavioral emphasis.* Champaign. Human Kinetics; 2011.
79. Muratori LM, Lamberg EM, Quinn L, Duff SV. Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation. *J Hand Ther.* avr 2013;26(2):94-103.

80. Benjaminse A, Welling W, Otten B, Gokeler A. Transfer of improved movement technique after receiving verbal external focus and video instruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* mars 2018;26(3):955-62.
81. Hunt C, Paez A, Folmar E. The impact of attentional focus on the treatment of musculoskeletal and movement disorders. *Int J Sports Phys Ther.* nov 2017;12(6):901-7.
82. Durham K, Van Vliet PM, Badger F, Sackley C. Use of information feedback and attentional focus of feedback in treating the person with a hemiplegic arm: Use of attentional focus of feedback following stroke. *Physiother Res Int.* juin 2009;14(2):77-90.
83. Kuhn Y -A., Keller M, Ruffieux J, Taube W. Adopting an external focus of attention alters intracortical inhibition within the primary motor cortex. *Acta Physiol Oxf Engl.* juin 2017;220(2):289-99.
84. Luc-Harkey BA, Harkey MS, Pamukoff DN, Kim RH, Royal TK, Blackburn JT, et al. Greater intracortical inhibition associates with lower quadriceps voluntary activation in individuals with ACL reconstruction. *Exp Brain Res.* avr 2017;235(4):1129-37.
85. Negahban H, Ahmadi P, Salehi R, Mehravar M, Goharpey S. Attentional demands of postural control during single leg stance in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Neurosci Lett.* nov 2013;556:118-23.
86. Park SH, Yi CW, Shin JY, Ryu YU. Effects of external focus of attention on balance: a short review. *J Phys Ther Sci.* déc 2015;27(12):3929-31.
87. Laufer Y, Rotem-Lehrer N, Ronen Z, Khayutin G, Rozenberg I. Effect of Attention Focus on Acquisition and Retention of Postural Control Following Ankle Sprain. *Arch Phys Med Rehabil.* janv 2007;88(1):105-8.
88. Shamseer L, Moher D, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: elaboration and explanation. *BMJ.* 2 janv 2015;349(jan02 1):g7647-g7647.
89. Haute Autorité de Santé. Niveau de preuve et gradation des recommandations de bonne pratique [Internet]. 2013. Disponible sur: www.has-sante.fr
90. Sackett D, Strauss S, Richardson W, et al. Evidence-Based medicine: how to practice and teach EBM. Second edition. Edinburgh: Churchill Livingstone; 2000.
91. PEDro. Échelle PEDro - Français [Internet]. PEDro. [cité 1 mars 2023]. Disponible sur: <https://pedro.org.au/french/resources/pedro-scale/>
92. Ghaderi M, Letafatkar A, Thomas AC, Keyhani S. Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* déc 2021;13(1):49.
93. Gokeler A, Benjaminse A, Welling W, Alferink M, Eppinga P, Otten B. The effects of attentional focus on jump performance and knee joint kinematics in patients after ACL

- reconstruction. *Phys Ther Sport Off J Assoc Chart Physiother Sports Med.* mai 2015;16(2):114-20.
94. The Ottawa Hospital - research Institute. Échelle Newcastle-Ottawa [Internet]. The Ottawa Hospital - research Institute. [cité 1 mars 2023]. Disponible sur: https://www.ohri.ca/programs/clinical_epidemiology/oxford.asp
 95. Ahmadi P, Salehi R, Mehravar M, Goharpey S, Negahban H. Comparing the effects of external focus of attention and continuous cognitive task on postural control in anterior cruciate ligament reconstructed athletes. *Neurosci Lett.* 10 janv 2020;715:134666.
 96. Padua DA, DiStefano LJ, Hewett TE, Garrett WE, Marshall SW, Golden GM, et al. National Athletic Trainers' Association Position Statement: Prevention of Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Athl Train.* janv 2018;53(1):5-19.
 97. Arundale AJH, Bizzini M, Giordano A, Hewett TE, Logerstedt DS, Mandelbaum B, et al. Exercise-Based Knee and Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention: Clinical Practice Guidelines Linked to the International Classification of Functioning, Disability and Health From the Academy of Orthopaedic Physical Therapy and the American Academy of Sports Physical Therapy. *J Orthop Sports Phys Ther.* sept 2018;48(9):A1-42.
 98. Guerrero-Bote VP, Moya-Anegón F. A further step forward in measuring journals' scientific prestige: The SJR2 indicator. *J Informetr.* oct 2012;6(4):674-88.
 99. SJR. Help SJR [Internet]. SJR -Scimago Journal & Country Rank. [cité 5 mars 2023]. Disponible sur: <https://www.scimagojr.com/help.php>
 100. Haute Autorité de Santé. Efficacité des méthodes de mise en œuvre des recommandations médicales. 2014 juill.
 101. Sacré M, Lafontaine D, Toczek MC. Comprendre et concevoir des revues systématiques de la littérature en sciences de l'éducation et de la formation. *Nouv Cah Rech En Éducation.* 2021;23(2):1.
 102. Howick J, et al. OCEBM Levels of Evidence [Internet]. 2011 [cité 10 mars 2023]. Disponible sur: <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebmllevels-of-evidence>
 103. Gauvain C. Essais contrôlés randomisés : quelques clés méthodologiques pour comprendre. *Rev Mal Respir Actual.* sept 2021;13(2):2555-62.
 104. Aubin-Auger I, Mercier A, Baumann L, Lehr-Drylewicz AM, Imbert P, Letrilliart L. Introduction à la recherche qualitative. *Exercer.* 1 janv 2008;84:142-5.
 105. Shao Q, MacLeod TD, Manal K, Buchanan TS. Estimation of Ligament Loading and Anterior Tibial Translation in Healthy and ACL-Deficient Knees During Gait and the Influence of Increasing Tibial Slope Using EMG-Driven Approach. *Ann Biomed Eng.* 2011;39(1):110.

106. Bakker R, Tomescu S, Brenneman E, Hangalur G, Laing A, Chandrashekar N. Effect of sagittal plane mechanics on ACL strain during jump landing: ACL STRAIN DURING JUMP LANDING. *J Orthop Res.* sept 2016;34(9):1636-44.
107. ter Stege MHP, Dallinga JM, Benjaminse A, Lemmink KAPM. Effect of Interventions on Potential, Modifiable Risk Factors for Knee Injury in Team Ball Sports: A Systematic Review. *Sports Med.* oct 2014;44(10):1403-26.
108. Rotem-Lehrer N, Laufer Y. Effect of Focus of Attention on Transfer of a Postural Control Task Following an Ankle Sprain. *J Orthop Sports Phys Ther.* sept 2007;37(9):564-9.
109. Laufer Y, Rotem-Lehrer N, Ronen Z, Khayutin G, Rozenberg I. Effect of Attention Focus on Acquisition and Retention of Postural Control Following Ankle Sprain. *Arch Phys Med Rehabil.* janv 2007;88(1):105-8.
110. van Melick N, van Cingel REH, Brooijmans F, Neeter C, van Tienen T, Hullegie W, et al. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *Br J Sports Med.* déc 2016;50(24):1506-15.
111. Chiari L, Bertani A, Cappello A. Classification of visual strategies in human postural control by stochastic parameters. *Hum Mov Sci.* 2000;
112. Paillard T. Relationship Between Sport Expertise and Postural Skills. *Front Psychol.* 25 juin 2019;10:1428.
113. Paillard T. Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience. *Neurosci Biobehav Rev.* janv 2017;72:129-52.
114. Santello M, McDonagh MJN, Challis JH. Visual and non-visual control of landing movements in humans. *J Physiol.* nov 2001;537(1):313-27.
115. Okuda K, Abe N, Katayama Y, Senda M, Kuroda T, Inoue H. Effect of vision on postural sway in anterior cruciate ligament injured knees. *J Orthop Sci.* mai 2005;10(3):277-83.
116. Friden T, Roberts D, Movin T, Wredmark T. Function after anterior cruciate ligament injuries: Influence of visual control and proprioception. *Acta Orthop Scand.* janv 1998;69(6):590-4.
117. Wilkins L, Nelson C, Tweddle S. Stroboscopic Visual Training: a Pilot Study with Three Elite Youth Football Goalkeepers. *J Cogn Enhanc.* mars 2018;2(1):3-11.
118. Mitroff SR, Friesen P, Bennett D, Yoo H, Reichow AW. Enhancing Ice Hockey Skills Through Stroboscopic Visual Training: A Pilot Study. *Athl Train Sports Health Care.* nov 2013;5(6):261-4.
119. Appelbaum LG, Lu Y, Khanna R, Detwiler KR. The Effects of Sports Vision Training on Sensorimotor Abilities in Collegiate Softball Athletes. *Athl Train Sports Health Care.* juill 2016;8(4):154-63.

120. Appelbaum LG, Cain MS, Schroeder JE, Darling EF, Mitroff SR. Stroboscopic visual training improves information encoding in short-term memory. *Atten Percept Psychophys.* nov 2012;74(8):1681-91.
121. Masters RS w., Poolton JM, Maxwell JP, Raab M. Implicit Motor Learning and Complex Decision Making in Time-Constrained Environments. *J Mot Behav.* janv 2008;40(1):71-9.
122. Farrow D, Abernethy B. Can anticipatory skills be learned through implicit video based perceptual training? *J Sports Sci.* janv 2002;20(6):471-85.
123. Grooms DR, Kiefer AW, Riley MA, Ellis JD, Thomas S, Kitchen K, et al. Brain-Behavior Mechanisms for the Transfer of Neuromuscular Training Adaptions to Simulated Sport: Initial Findings From the Train the Brain Project. *J Sport Rehabil [Internet].* 1 sept 2018 [cité 20 mars 2023];27(5). Disponible sur: <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jsr/27/5/article-jsr.2017-0241.xml.xml>
124. Hirano M, Kubota S, Koizume Y, Tanaka S, Funase K. Different Effects of Implicit and Explicit Motor Sequence Learning on Latency of Motor Evoked Potential Evoked by Transcranial Magnetic Stimulation on the Primary Motor Cortex. *Front Hum Neurosci [Internet].* 4 janv 2017 [cité 20 mars 2023];10. Disponible sur: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2016.00671/full>
125. Schöllhorn WI, Mayer-Kress G, Newell KM, Michelbrink M. Time scales of adaptive behavior and motor learning in the presence of stochastic perturbations. *Hum Mov Sci.* juin 2009;28(3):319-33.
126. Benjaminse A, Otten E. ACL injury prevention, more effective with a different way of motor learning? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* avr 2011;19(4):622-7.
127. Henz D, Schöllhorn WI. Differential Training Facilitates Early Consolidation in Motor Learning. *Front Behav Neurosci [Internet].* 21 oct 2016 [cité 20 mars 2023];10. Disponible sur: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnbeh.2016.00199/full>
128. Wulf G, Shea C, Lewthwaite R. Motor skill learning and performance: a review of influential factors: Motor skill learning and performance. *Med Educ.* janv 2010;44(1):75-84.
129. Chiviawosky S, Wulf G. Self-Controlled Feedback: Does it Enhance Learning Because Performers Get Feedback When They Need It? *Res Q Exerc Sport.* déc 2002;73(4):408-15.
130. Chiviawosky S, Wulf G, Lewthwaite R. Self-Controlled Learning: The Importance of Protecting Perceptions of Competence. *Front Psychol.* 2 nov 2012;3:458.
131. Magill RA, Hall KG. A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Hum Mov Sci.* sept 1990;9(3-5):241-89.
132. Cross ES, Schmitt PJ, Grafton ST. Neural Substrates of Contextual Interference during Motor Learning Support a Model of Active Preparation. *J Cogn Neurosci.* 1 nov 2007;19(11):1854-71.

133. Landers M, Wulf G, Wallmann H, Guadagnoli M. An external focus of attention attenuates balance impairment in patients with Parkinson's disease who have a fall history. *Physiotherapy*. sept 2005;91(3):152-8.
134. Haute Autorité de Santé. Rééducation à la phase chronique de l'AVC de l'adulte : pertinence, indications et modalités [Internet]. 2022 juin [cité 12 avr 2023]. Disponible sur: <https://has-sante.fr>
135. Chiviawosky S, Wulf G, Lewthwaite R, Campos T. Motor learning benefits of self-controlled practice in persons with Parkinson's disease. *Gait Posture*. avr 2012;35(4):601-5.
136. Dick MB, Andel R, Hsieh S, Bricker J, Davis DS, Dick-Muehlke C. Contextual Interference and Motor Skill Learning in Alzheimer's Disease. *Aging Neuropsychol Cogn*. 2 déc 2000;7(4):273-87.
137. Lin CH (Janice), Sullivan KJ, Wu AD, Kantak S, Winstein CJ. Effect of Task Practice Order on Motor Skill Learning in Adults With Parkinson Disease: A Pilot Study. *Phys Ther*. 1 sept 2007;87(9):1120-31.
138. Borsook D, Kussman BD, George E, Becerra LR, Burke DW. Surgically Induced Neuropathic Pain: Understanding the Perioperative Process. *Ann Surg*. mars 2013;257(3):403-12.
139. Lepley LK, Palmieri-Smith RM. Pre-operative quadriceps activation is related to post-operative activation, not strength, in patients post-ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. janv 2016;24(1):236-46.
140. Gutierrez T, Hornigold R, Pearce A. The systemic response to surgery. *Surg Oxf*. févr 2011;29(2):93-6.
141. Pietrosimone BG, Lepley AS, Ericksen HM, Clements A, Sohn DH, Gribble PA. Neural Excitability Alterations After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Athl Train*. 1 juin 2015;50(6):665-74.
142. Young SW, Valladares RD, Loi F, Dragoo JL. Mechanoreceptor Reinnervation of Autografts Versus Allografts After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthop J Sports Med*. 1 oct 2016;4(10):232596711666878.
143. Murray MM, Flutie BM, Kalish LA, Ecklund K, Fleming BC, Proffen BL, et al. The Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair (BEAR) Procedure: An Early Feasibility Cohort Study. *Orthop J Sports Med*. 1 nov 2016;4(11):232596711667217.
144. Nwachukwu BU, Patel BH, Lu Y, Allen AA, Williams RJ. Anterior Cruciate Ligament Repair Outcomes: An Updated Systematic Review of Recent Literature. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg*. juill 2019;35(7):2233-47.
145. Benjaminse A, Welling W, Otten B, Gokeler A. Novel methods of instruction in ACL injury prevention programs, a systematic review. *Phys Ther Sport*. mai 2015;16(2):176-86.

146. Chiviacowsky S, Wulf G, Wally R. An external focus of attention enhances balance learning in older adults. *Gait Posture*. oct 2010;32(4):572-5.
147. Welling W, Benjaminse A, Gokeler A, Otten B. Enhanced retention of drop vertical jump landing technique: A randomized controlled trial. *Hum Mov Sci*. févr 2016;45:84-95.

Annexe I : Exemples d'instructions avec FAI ou FAE, tirés de l'étude de Hunt et al (2017)(81)..I	I
Annexe II : Échelle d'évaluation méthodologique PEDRO pour les ECR (français).....II	II
Annexe III : Échelle d'évaluation méthodologique Newcastle-Ottawa, pour les études cas-témoins.....III	III
Annexe IV : Résultats détaillés des ECR.....IV	IV

Annexe I – Exemples d’instructions avec FAI ou FAE, tirés de l’étude de Hunt et al (2017)(81).

Etude	Tâche expérimentale	Instructions FAE	Instructions FAI
Chiviacosky et al. (2010)(146)	Stabilisation horizontale d’une plateforme d’équilibre	« Regardez droit devant, essayez de garder les marqueurs devant vos pieds à l’horizontale »	« Regardez droit devant. Maintenez votre attention à garder vos pieds horizontaux »
Gokeler et al. (2015) (93)	Saut unipodal vers l’avant	« Sautez aussi loin que vous le pouvez. Lors de votre saut, pensez à pousser sur le sol le plus fort que vous pouvez »	« Sautez aussi loin que vous le pouvez. Lors de votre saut, pensez à tendre vos genoux le plus rapidement possible »
Landers et al. (2005)(133)	Performance d’équilibre sur plateforme dynamique informatisée	« Tenez-vous debout les yeux ouverts, et concentrez-vous pour exercer une pression égale sur les rectangles »	« « Tenez-vous debout les yeux ouverts, et concentrez-vous pour exercer une pression égale sur vos pieds »
Welling et al. (2016)(147)	Réception d’une hauteur enchaînée avec un saut vertical maximal	« Repoussez le sol aussi fort que possible après avoir atterri sur la plateforme de force »	« Tendez-vos genoux le plus rapidement possible après avoir atterri sur la plateforme de forces »

Annexe II – Échelle d'évaluation méthodologique PEDRO pour les ECR (français)

Échelle PEDro – Français

1. les critères d'éligibilité ont été précisés	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
2. les sujets ont été répartis aléatoirement dans les groupes (pour un essai croisé, l'ordre des traitements reçus par les sujets a été attribué aléatoirement)	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
3. la répartition a respecté une assignation secrète	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
4. les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
5. tous les sujets étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
6. tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
7. tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
8. les mesures, pour au moins un des critères de jugement essentiels, ont été obtenues pour plus de 85% des sujets initialement répartis dans les groupes	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
9. tous les sujets pour lesquels les résultats étaient disponibles ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle conformément à leur répartition ou, quand cela n'a pas été le cas, les données d'au moins un des critères de jugement essentiels ont été analysées "en intention de traiter"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
10. les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
11. pour au moins un des critères de jugement essentiels, l'étude indique à la fois l'estimation des effets et l'estimation de leur variabilité	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:

L'échelle PEDro est basée sur la liste Delphi développée par Verhagen et ses collègues au département d'épidémiologie de l'Université de Maastricht (Verhagen AP et al (1998). *The Delphi list: a criteria list for quality assessment of randomised clinical trials for conducting systematic reviews developed by Delphi consensus. Journal of Clinical Epidemiology, 51(12):1235-41*). Cette liste est basée sur un "consensus d'experts" et non, pour la majeure partie, sur des données empiriques. Deux items supplémentaires à la liste Delphi (critères 8 et 10 de l'échelle PEDro) ont été inclus dans l'échelle PEDro. Si plus de données empiriques apparaissent, il deviendra éventuellement possible de pondérer certains critères de manière à ce que le score de PEDro reflète l'importance de chacun des items.

L'objectif de l'échelle PEDro est d'aider l'utilisateur de la base de données PEDro à rapidement identifier quels sont les essais cliniques réellement ou potentiellement randomisés indexés dans PEDro (c'est-à-dire les essais contrôlés randomisés et les essais cliniques contrôlés, sans précision) qui sont susceptibles d'avoir une bonne validité interne (critères 2 à 9), et peuvent avoir suffisamment d'informations statistiques pour rendre leurs résultats interprétables (critères 10 à 11). Un critère supplémentaire (critère 1) qui est relatif à la validité "externe" (c'est "la généralisabilité" de l'essai ou son "applicabilité") a été retenu dans l'échelle PEDro pour prendre en compte toute la liste Delphi, mais ce critère n'est pas comptabilisé pour calculer le score PEDro cité sur le site Internet de PEDro.

L'échelle PEDro ne doit pas être utilisée pour mesurer la "validité" des conclusions d'une étude. En particulier, nous mettons en garde les utilisateurs de l'échelle PEDro sur le fait que les études qui montrent des effets significatifs du traitement et qui ont un score élevé sur l'échelle PEDro, ne signifie pas nécessairement que le traitement est cliniquement utile. Il faut considérer aussi si la taille de l'effet du traitement est suffisamment grande pour que cela vaille la peine cliniquement d'appliquer le traitement. De même, il faut évaluer si le rapport entre les effets positifs du traitement et ses effets négatifs est favorable. Enfin, la dimension coût/efficacité du traitement est à prendre compte pour effectuer un choix. L'échelle ne devrait pas être utilisée pour comparer la "qualité" des essais réalisés dans différents domaines de la physiothérapie, essentiellement parce qu'il n'est pas possible de satisfaire à tous les items de cette échelle dans certains domaines de la pratique kinésithérapique.

Dernière modification le 21 juin 1999. Traduction française le 1 juillet 2010

Annexe III : Échelle d'évaluation méthodologique Newcastle-Ottawa, pour les études cas-témoins

NEWCASTLE - OTTAWA QUALITY ASSESSMENT SCALE CASE CONTROL STUDIES

Note: A study can be awarded a maximum of one star for each numbered item within the Selection and Exposure categories. A maximum of two stars can be given for Comparability.

Selection

- 1) Is the case definition adequate?
 - a) yes, with independent validation
 - b) yes, eg record linkage or based on self reports
 - c) no description
- 2) Representativeness of the cases
 - a) consecutive or obviously representative series of cases
 - b) potential for selection biases or not stated
- 3) Selection of Controls
 - a) community controls
 - b) hospital controls
 - c) no description
- 4) Definition of Controls
 - a) no history of disease (endpoint)
 - b) no description of source

Comparability

- 1) Comparability of cases and controls on the basis of the design or analysis
 - a) study controls for _____ (Select the most important factor.)
 - b) study controls for any additional factor (This criteria could be modified to indicate specific control for a second important factor.)

Exposure

- 1) Ascertainment of exposure
 - a) secure record (eg surgical records)
 - b) structured interview where blind to case/control status
 - c) interview not blinded to case/control status
 - d) written self report or medical record only
 - e) no description
- 2) Same method of ascertainment for cases and controls
 - a) yes
 - b) no
- 3) Non-Response rate
 - a) same rate for both groups
 - b) non respondents described
 - c) rate different and no designation

Annexe IV : Tableau des résultats détaillés des ECR.

Gokeler et al. (2015)	Côté non-opéré			Côté opéré		
	FAI	FAE	Taille d'effet (d de Cohen)	FAI	FAE	Taille d'effet (d de Cohen)
Angle de FLX du genou au contact initial (°)				27,25 +/- 11,09	37,38 +/- 6,44	1,12
Angle de FLX maximale du genou (°)	51,63 +/- 12,93	69,26 +/- 12,21	1,4	51,75 +/- 16,67	69,54 +/- 11,44	1,24
Temps pour atteindre l'angle de FLX maximale du genou (sec)	0,16 +/- 0,03	0,21 +/- 0,04	1,41	0,16 +/- 0,05	0,21 +/- 0,03	1,21

1,4 : taille d'effet grande ($d > 0,8$) des valeurs mesurées

Ghaderi et al. (2021)	Groupe expérimental			
	Mesure de référence	Mesure fin d'expérimentation	Changement (en %)	Taille d'effet (d de Cohen)
Angle de FLX maximale du tronc (°)	23,2 +/- 10,3	48,3 +/- 10,8	+108,59	0,76
Angle de FLX maximale de la hanche (°)	22,3 +/- 6,8	35,3 +/- 5,1	+58,37	0,73
Angle de FLX maximale du genou (°)	39,7 +/- 10,54	56,8 +/- 10,3	+43,21	0,6
Pic d'ABD du genou (°)	8,1 +/- 1,18	5,7 +/- 0,8	-29,64	0,77
Pic de RI maximale du genou (°)	15,9 +/- 2,15	12,8 +/- 1,2	-19,86	0,76
Force de réaction verticale au sol (vGRF) (N/MC)	3,4 +/- 1,9	2,2 +/- 0,5	-34,21	0,54
Moment d'EXT maximal du genou (N/kg)	3,5 +/- 1,3	2,7 +/- 0,7	-22,85	0,64
Moment d'ABD maximal du genou (N.kg)	1,6 +/- 0,7	1,0 +/- 0,8	-37,5	0,64
Force maximale de cisaillement antérieur du tibia (MC)	0,8 +/- 0,6	0,7 +/- 0,5	-12,5	0,66

FLX = flexion / ABD = abduction / RI = rotation interne / MC = masse corporelle (kg)

0,6 : taille d'effet modérée ($0,5 > d > 0,8$).

+108,59 : diminution de la valeur après expérimentation (%).

-29,64 : augmentation de la valeur après expérimentation (%).

