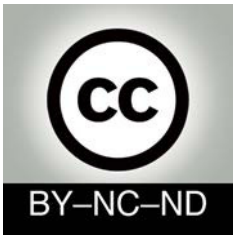
http://portaildoc.univ-lyon1.fr

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Université Claude Bernard Lyon 1

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation

Département Masso-Kinésithérapie

Mémoire N°2069

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie

Par

TLILI Bilâl

La biomécanique de course a-t-elle un impact sur le mécanisme lésionnel des ischio-jambiers au football et en athlétisme : une revue de la littérature

Does running biomechanics impact the hamstring injury mechanism in football and athletics : a review of the literature

Directeur de mémoire

RIC Sylvain

THIRIET Patrice

Année 2024-2025

Session 1

Membres du jury

RIC Sylvain

BOUTARD Rachel

SELLAL Romain

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

PRÉFET
DE LA RÉGION
AUVERGNE-
RHÔNE-ALPES
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale
de l'économie, de l'emploi,
du travail et des solidarités (DREETS)

CHARTE ANTI-PLAGIAT
DE LA DREETS AUVERGNE-RHONE-ALPES

La Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités (DREETS) délivre sous l'autorité du préfet de région les diplômes paramédicaux et du travail social.
C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre, et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue, que les directives suivantes sont formulées.
Elles concernent l'ensemble des candidats devant fournir un travail écrit dans le cadre de l'obtention d'un diplôme d'État, qu'il s'agisse de formation initiale ou de parcours VAE.
La présente charte définit les règles à respecter par tout candidat, dans l'ensemble des écrits servant de support aux épreuves de certification du diplôme préparé (mémoire, travail de fin d'études, livret2).
Il est rappelé que « le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable »[1].

La contrefaçon (le plagiat est, en droit, une contrefaçon) **est un délit** au sens des articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle.

Article 1 :

Le candidat au diplôme s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

Article 2 :

Le plagiaire s'expose à des procédures disciplinaires. De plus, en application du Code de l'éducation[2] et du Code de la propriété intellectuelle[3], il s'expose également à des poursuites et peines pénales.

Article 3 :

Tout candidat s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, cette charte dûment signée qui vaut engagement :

Je soussigné(e) : TLILI Bilâl atteste avoir pris connaissance de la charte anti-plagiat élaborée par la DREETS Auvergne-Rhône-Alpes et de m'y être conformé(e)
Je certifie avoir rédigé personnellement le contenu du présent manuscrit en vue de l'obtention du Diplôme d'État en Masso-kinésithérapie.

Zér Plagiat

Fait à Lyon, Le 04/04/2025
Signature



[1] Site Université de Nantes : http://www.univ-nantes.fr/statuts-et-chartes-usagers/dossier-plagiat-784821.kjsp
[2] Article L331-3 : « les fraudes commises dans les examens et les concours publics qui ont pour objet l'acquisition d'un diplôme délivré par l'Etat sont réprimées dans les conditions fixées par la loi du 23 décembre 1901 réprimant les fraudes dans les examens et concours publics »
[3] Article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Université Claude Bernard Lyon 1

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation

Département Masso-Kinésithérapie

Mémoire N°2069

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie

Par

TLILI Bilâl

La biomécanique de course a-t-elle un impact sur le mécanisme lésionnel des ischio-jambiers au football et en athlétisme : une revue de la littérature

Does running biomechanics impact the hamstring injury mechanism in football and athletics : a review of the literature

Directeur de mémoire

RIC Sylvain

THIRIET Patrice

Année 2024-2025

Session 1

Membres du jury

RIC Sylvain

BOUTARD Rachel

SELLAL Romain

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Université Claude Bernard Lyon 1

Président
Pr. Bruno LINA

Secteur Santé

Institut des Sciences et Techniques
de Réadaptation (ISTR)
Directeur
Pr. Jacques LUAUTE

U.F.R. de Médecine Lyon Est
Doyen
Pr. Gilles RODE

U.F.R d'Odontologie
Doyen
Pr. Jean-Christophe MAURIN

U.F.R de Médecine et Maïeutique Lyon-Sud Charles Mérieux
Doyen
Pr. Philippe PAPAREL

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques (ISBP)
Doyen
Pr. Claude DUSSART

Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine
Directrice administrative
Mme Laetitia BIGNON

Comité de Coordination des Etudes Médicales (CCEM)
Président
Pr. Pierre COCHAT

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Université Claude Bernard Lyon 1
Département de masso-kinésithérapie
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

Institut Sciences et Techniques de la Réadaptation

Département MASSO-KINESITHERAPIE

Directeur ISTR

Jacques LUAUTE

Équipe de direction du département de Masso-kinésithérapie

Directrice de la formation

Ayodélé MADI

Responsable des travaux de recherche

Denis JAUDOIN

Référents d'années

Ilona BESANCON (MK3)

Edith COMEMALE (MK4)

Denis JAUDOIN (MK5)

Léo VIVIANI (MK2)

Référente de la formation clinique

Maëva DUVERGER

Responsable Scolarité-Pôle transverse

Rachel BOUTARD

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Université Claude Bernard Lyon 1
Département de masso-kinésithérapie
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

UE27 – UE28

DECLARATION DE RECOURS A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

Je soussigné(e) TLILI Bilâl, Étudiant(e) en 5ème année du cursus de masso-kinésithérapie (cochez)

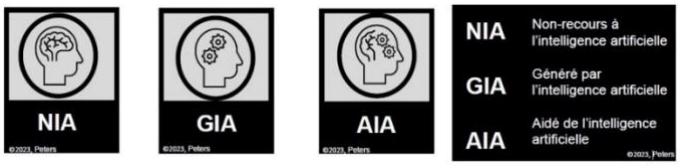
☐ Déclare ne pas avoir eu recours à l'IA dans le cadre de mon parcours de recherche.

■ Déclare avoir eu un recours responsable et transparent à l'IA dans ma méthodologie de recherche, en application des recommandations du Département de masso-kinésithérapie, notamment en matière d'intégrité académique, de pertinence et d'éthique scientifiques et de conformité aux règles de protection des données inhérentes au RGPD.
J'atteste, en l'espèce :

- Que chaque utilisation ne s'est pas substituée à un travail final de relecture critique, attentive et distanciée du résultat produit, en prenant en compte les risques de biais spécifiques à l'IA.
- Que chaque recours à l'IA ait fait l'objet d'une mention détaillée dans le corps de texte, complétée d'une citation en application de la norme APA en vigueur.
- Avoir veillé à prévenir tout risque de plagiat, de violation de droits d'auteur ou de perte de propriété intellectuelle, potentiellement induit par l'IA générative.
- Que le recours raisonné à l'IA ait été discuté avec mon(es) Directeur(s) de mémoire.

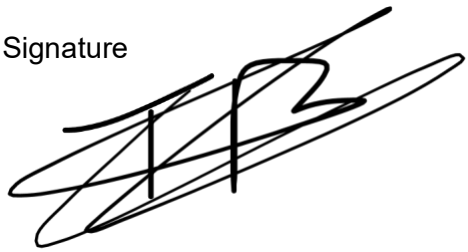
Je déclare avoir eu recours à l'IA, pour la rédaction du présent manuscrit, dans les contextes suivants (cochez) :

☐ Aide prudente à l'exploration d'idées de recherche ou à des croisements d'informations
☐ Test de questions de recherche et des hypothèses attenantes
☐ Assistance initiale à la (re)structuration du plan ou de la trame du contenu
■ Aide à la traduction d'abstracts ou à la lecture critique d'articles préalablement validés
☐ Assistance au traitement et/ou à l'analyse d'informations ou de données non sensibles
☐ Aide à la mise en forme et/ou à la visualisation de résultats dans une forme optimisée
■ Assistance linguistique et/ou sémantique sans altération de fond du texte
☐ Autre (détaillez) : ……
……



Fait à Lyon, le 04/04/2025

Signature



(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Remerciements

Je voudrais d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Monsieur Sylvain Ric, pour sa disponibilité, son engagement et la qualité de ses conseils depuis le commencement de la rédaction de cette thèse.

Je remercie également Monsieur Denis Jaudoin, notre référent de dernière année et responsable des travaux de recherche, pour son soutien précieux et son assistance exceptionnelle tout au long de l'année.

Ma reconnaissance s'adresse également à mes parents, qui ont rendu possible ma formation grâce leur appui constant tout au long de mon parcours scolaire. Je les remercie de m'avoir soutenu et encouragé durant mon année de préparation au concours STAPS.

Je remercie l'ensemble des tuteurs de stage que j'ai pu rencontrer durant mon parcours. Leurs compétences pratiques couplées au relationnel m'ont permis d'apprendre davantage et ainsi de m'améliorer.

Ces mots s'adressent également à toutes personnes qui ont soutenu ma candidature auprès de l'IFMK de Lyon ; Emilie Lamazouère, Ana Gaspar, Ludovic Poirey, Marwan Moudakkar, Laurence Bellon et Anne Marlier. Merci pour votre confiance et votre appui à un moment clé de mon parcours.

Pour finir, je souhaite exposer mes plus sincères appréciations à mon entraîneur Grégory Duval pour son aide constante tout au long de ma formation en kinésithérapie. Ses conseils avisés et son implication ont été d'une aide précieuse non seulement pour le développement de mes aptitudes professionnelles, mais également pour l'accomplissement de cette thèse. Je tiens également à remercier chaleureusement mon groupe d'entraînement, dont les membres ont été des sources d'inspiration et de motivation au quotidien. Malgré les nombreuses lésions aux ischio-jambiers auxquelles ils sont fréquemment confrontés (Théo Hildenbrand, Ewen Gregory, Adrien Fortier, Maïly Bauguil…), leur participation active a été essentielle pour l'élaboration de ce mémoire et leur soutien, tout au long de ce projet, a été d'une importance primordiale.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Liste des acronymes :

- IJ : Ischio-jambiers
- LMA : Lésion Myo-Aponévrotique
- NH : Nordic Hamstring
- BF : Biceps fémoral
- BFlp : Biceps fémoral longue portion
- ST : Semi-tendineux
- SM : Semi-membraneux
- EMG : Électromyogramme
- RDL : Revue de la littérature

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Table des matières

1. Introduction 1

2. Cadre conceptuel 4

1.1. Rappels anatomiques 4

1.1.1. Muscle biceps fémoral 5

1.1.2. Muscle semi-tendineux 6

1.1.3. Muscle semi-membraneux 6

1.1.4. Fascias 6

1.2. La lésion myo-aponévrotique 7

1.2.1. Définition et physiopathologie 7

1.2.2. Mécanisme lésionnel 8

1.2.3. Classification et diagnostic 10

1.2.4. Recommandations 11

3. Méthodes 13

3.1. Description de la stratégie de recherche 13

3.1.1. Bases de données 13

3.1.2. Critères d'éligibilité 14

3.1.3. Mots clés et équation de recherche 16

3.1.4. Stratégies de sélection des articles 17

3.2. Méthodologie d'analyse de la littérature 18

3.2.1. Extraction des données 18

3.2.2. Analyse des données 18

3.2.3. Évaluation de la qualité méthodologique 19

3.3. Description de l'analyse statistique 21

4. Résultats 22

4.1. Sélection des études 22

4.2. Études retenues 23

4.3. Caractéristiques des articles sélectionnés 24

4.3.1. Généralité et spécificité 24

4.3.2. Évaluation de la qualité des articles et biais méthodologiques 36

4.4. Analyse statistique descriptive 38

4.4.1. Types d'études 38

4.4.2. Taille des échantillons 39

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.4.3. Orientation méthodologique et critères de jugement principaux 39

4.5. Résultats des études 41

4.5.1. Rôle de la mécanique de course de sprint dans l'influence de la tension des muscles ischio-jambiers 41

4.5.2. Influence de la fatigue et de la coordination neuromusculaire sur la biomécanique de course ? 43

4.5.3. Interventions et prévention des blessures aux ischio-jambiers 43

5. Discussion 45

5.1. Rappel des objectifs de l'étude 45

5.2. Synthèse et interprétation des résultats principaux 45

5.2.1. Paramètres biomécaniques 45

5.2.2. Optimisation de l'entraînement pour un sprint performant 51

5.3. Comparaison avec la littérature existante 56

5.4. Forces et limites de l'étude 65

5.5. Perspectives et implications cliniques 66

6. Conclusion 68

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Liste des tableaux

Tableau I – Critères d'inclusion et exclusion 14

Tableau II - Définition des critères PICO 16

Tableau III – Les différents biais 19

Tableau IV : Grades des recommandations (Haute Autorité de santé, 2013) 20

Tableau V : Caractéristiques de l'étude de Bramah et al. 25

Tableau VI : Caractéristiques de l'étude de Vicens-Bordas et al. 26

Tableau VII : Caractéristiques de l'étude de Kalkhoven et al. 27

Tableau VIII : Caractéristiques de l'étude de Kalema et al. 28

Tableau IX : Caractéristiques de l'étude de Huygaerts et al. 29

Tableau X : Caractéristiques de l'étude de Wan et al. 30

Tableau XI : Caractéristiques de l'étude de Street et al. 31

Tableau XII : Caractéristiques générales des articles retenus 32

Tableau XIII : Qualité méthodologique de l'étude de Wan et al. en lien avec l'échelle PEDro 36

Tableau XIV – Évaluation méthodologique des revues narratives selon l'échelle SANRA 37

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Liste des figures

Figure 1 : Illustration des 3 chefs musculaires des ischio-jambiers (Kamina 2013) 4

Figure 2 : Les phases du sprint ; phase d'appui (stance phase) et phase oscillante (swing phase) 8

Figure 3 : L'activation de la longue portion du biceps fémoral durant la phase oscillation 9

Figure 4 : Classification des lésions musculaires selon Durey et Rodineau 10

Figure 5 : Protocole PEACE & LOVE issu de la Clinique du Coureur 12

Figure 6 : Diagramme de flux selon la méthode PRISMA (Moher et al., 2009) 22

Figure 7 : Principe de la triple extension 48

Figure 8 : Principe de l'over-striding 53

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Résumé :

Contexte/Introduction : Les lésions aux ischio-jambiers sont parmi les blessures les plus fréquentes et les plus récidivantes chez les sportifs, notamment dans des disciplines impliquant des sprints répétés. Actuellement, les stratégies de prévention et de rééducation de ce type de lésion se concentrent sur le développement des qualités de force excentrique, bien que ces interventions aient prouvé leur efficacité dans certains contextes, certaines études rapportent des résultats contradictoires. Une attention croissante est alors portée à l'analyse de la biomécanique de course, et par conséquent, aux stratégies d'entraînement préventif et aux adaptations structurelles induites par différents exercices spécifiques.

Méthode : La méthodologie PRISMA a été suivie pour réaliser cette revue de la littérature. Des recherches ont été effectuées dans les bases de données PubMed, ScienceDirect et Cochrane Library, de janvier à septembre 2024. Les critères d'inclusion comprenaient des articles en anglais, publiés entre 2014 et 2024, sous forme de méta-analyses, de revues de la littérature et d'essais contrôlés randomisés. La qualité méthodologique des études incluses a été évaluée via l'échelle SANRA et PEDro.

Résultats : Sept études ont été retenues avec un score PEDro et SANRA moyen concluant une bonne qualité méthodologique, L'analyse des études disponibles met en lumière une absence de méthodes standardisées permettant d'évaluer de manière précise le lien entre la biomécanique de la course à haute vitesse et les lésions des ischio-jambiers. Les auteurs soulignent que les études actuelles peinent à identifier des paramètres biomécaniques spécifiques comme facteurs de risque isolés.

Discussion : Des éléments potentiels suggèrent qu'un lien pourrait exister entre certaines variables biomécaniques du sprint et la survenue de lésions des ischio-jambiers. Des paramètres biomécaniques tels que la flexion maximale de hanche, le contrôle lombo-pelvien et la position du tronc sont alors identifiés comme des facteurs clés. Toutefois, une approche multifactorielle est essentielle pour une prévention individualisée.

Conclusion : Aucune solution unique ne peut prévenir toutes les blessures aux ischio-jambiers. Pour réduire ce risque, les programmes de prévention doivent viser à réduire les contraintes mécaniques appliquées et renforcer la capacité des tissus à supporter ces contraintes.

Mots clés : ischio-jambiers ; prévention ; sprint ; biomécanique ; football ; athlétisme ; blessure ; lésions ischio-jambiers

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Abstract

Background : Hamstring strain injuries are among the most frequent and recurrent injuries for athletes, particularly in sports involving repeated sprinting efforts. Currently, prevention and rehabilitation strategies focus primarily on developing eccentric strength capacities. While such interventions have proven effective in certain contexts, some studies report contradictory results. As a result, growing attention is being directed toward the analysis of running biomechanics, and consequently, to preventive training strategies and the structural adaptations induced by various specific exercises.

Methods : The PRISMA methodology was used to carry out this literature review. A literature search was conducted in the PubMed, ScienceDirect, and Cochrane Library databases from January to September 2024. Inclusion criteria included articles in English, published between 2014 and 2024, in the form of meta-analyses, literature reviews and randomised controlled trials. The methodological quality of the included studies was assessed using the SANRA and PEDro scales.

Results : Seven studies were included, with an average PEDro and SANRA score indicating good methodological quality. Analysis of the available studies highlights a lack of standardized methods to accurately assess the relationship between high-speed running biomechanics and hamstring injuries. The authors point out that current studies have difficulty identifying specific biomechanical parameters as isolated risk factors.

Discussion : Potential evidence suggests that certain biomechanical sprint variables may be linked to the occurrence of hamstring injuries. Biomechanical parameters such as maximal hip flexion, lumbopelvic control, and trunk position are thus identified as key factors. However, a multifactorial approach remains essential for effective and individualized prevention.

Conclusion : There is potential evidence to suggest that there may be a link between certain biomechanical variables in sprinting and the occurrence of hamstring injuries. However, a multifactorial approach is essential for individualised prevention.

Keywords : Hamstrings ; prevention; sprinting ; biomechanics ; football; athletics ; injury ; hamstring injuries

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

1. Introduction

Les aptitudes aérobies innées de l'être humain mettent en lumière l'interaction complexe entre notre héritage génétique et les exigences sportives contemporaines, telles que la célèbre course du 100 mètres. Cette interaction s'étend également aux fascias, des tissus conjonctifs qui enveloppent et soutiennent les muscles. Toutefois, les mouvements explosifs et répétitifs liés aux sprints peuvent entraîner des blessures fréquentes des ischio-jambiers, souvent associés à une atteinte de leurs tissus conjonctifs. Dans ce contexte, une compréhension approfondie de la biomécanique de course devient essentielle pour prévenir ces lésions et améliorer les performances sportives.

Comment la kinésithérapie peut-elle contribuer à l'optimisation de la biomécanique de course, et ainsi améliorer le cadre de prévention des blessures sportives ?

La question de savoir si la technique de course influe sur les mécanismes de lésion des ischio-jambiers dans les sports tels que le football et l'athlétisme est d'une importance capitale pour plusieurs raisons. Une analyse approfondie de cette relation est intéressante en raison de l'incidence élevée de ces atteintes dans les disciplines sportives, associée aux conséquences graves en termes d'indisponibilité des athlètes et d'impact sur leurs performances (3, 4). En effet, ces blessures ont un impact sur les athlètes et posent de nombreux problèmes pour les sponsors, les équipes et les clubs, aggravés par des dépenses médicales importantes (30), ainsi que leur impact sur le développement à long terme des jeunes joueurs (31). Ces blessures sont aussi liées à un coût financier considérable (par exemple, le coût moyen lié à la blessure d'un joueur de l'équipe première pendant un mois est d'environ 500 000 euros dans les ligues de football européennes) (32).

Pour ces raisons, des études récentes (4, 5, 40) ainsi que des travaux plus anciens (1, 44, 45) ont souligné l'importance de la biomécanique de course. De nombreuses recherches se sont penchées sur les modèles de mouvement, les angles articulaires (7) et la répartition des forces pendant la course, cherchant à identifier les facteurs qui contribuent à l'apparition des lésions des ischio-jambiers (4, 5, 40). Ces études visent à fournir des données précieuses pour élaborer des programmes d'entraînement et des stratégies de prévention spécifiques, afin de réduire le risque de blessures et d'améliorer les performances des athlètes dans ces sports exigeants.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

La lésion par étirement des ischio-jambiers est la blessure musculaire sans contact la plus courante dans les sports de course à grande vitesse tels que le football (23, 24, 25, 26) et l'athlétisme (33). Les taux de blessures sont particulièrement élevés, représentant 37 % de toutes les blessures musculaires dans le football (27) et plus de 17 % dans l'athlétisme (33). Lors du Carnaval de Penn Relays (16), une étude a montré que les lésions des ischio-jambiers étaient les blessures les plus courantes, représentant 24,1% de toutes les blessures et plus de 75 % de toutes les blessures du membre inférieur à différents niveaux de compétitions d'athlétisme. Concernant le football, une étude avec un suivi sur trois saisons consécutives de la première division italienne a montré que parmi 121 lésions du membre inférieur, 60% des lésions concernaient les ischio-jambiers (18). Avec une augmentation de 4 % chaque année et un taux de récidive estimé à 30 % (12, 26, 28, 29), cette blessure représente donc un défi de prévention majeur aussi bien dans l'athlétisme que dans le football.

Actuellement, les stratégies de prévention et de rééducation des lésions aux ischio-jambiers se concentrent sur le développement des qualités de force excentrique (34, 35, 36, 37). Cette méthode repose sur l'idée que le travail excentrique favorise le développement de l'architecture tissulaire et des propriétés musculaires, augmentant ainsi la capacité des ischio-jambiers à supporter les contraintes lors d'une course de sprint. L'emploi de techniques d'entraînement excentrique comme le Nordic Hamstring a démontré son efficacité pour diminuer les taux de blessures (14, 35). Bien que ces interventions aient prouvé des effets positifs dans certains contextes, d'autres études rapportent des résultats contradictoires, suggérant qu'elles ne permettent pas de contrer entièrement l'impact de ces exigences sportives intenses (48, 49, 50). De plus, malgré certaines avancées dans la compréhension de la relation entre la biomécanique de la course et les lésions des ischio-jambiers, il subsiste des limites dans les connaissances actuelles, nécessitant une exploration plus détaillée. Par exemple, Christopher Bramah souligne dans un article (5) qu'il existe un manque de méthodes établies en pratique pour évaluer la biomécanique du sprint et de seuils précis afin de distinguer une mécanique « normale » ou « anormale », ce qui constitue un obstacle au développement du processus de dépistage des blessures.

C'est pourquoi les questionnements suivants seront primordiaux pour notre avancée : Pourquoi les blessures des ischio-jambiers continuent-elles d'être si fréquentes malgré les avancées actuelles ? Comment expliquer un taux de récidive aussi élevé ? Quels sont les facteurs spécifiques de la biomécanique de course qui contribuent le plus aux lésions des ischio-jambiers ? Comment la technique de course peut-elle être modifiée pour réduire le risque de blessures des ischio-jambiers sans compromettre les performances sportives ? Quelles sont les différences de biomécanique de course entre les athlètes qui ont des

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

antécédents de blessures des ischio-jambiers et ceux qui n'en ont pas ? Quels sont les critères cliniques et les tests validés permettant au masseur-kinésithérapeute d'affirmer que le sportif est prêt à reprendre la compétition tout en minimisant le risque de récidive ?

L'ensemble de ces questionnements et nos premières recherches nous ont conduit à dégager la problématique générale suivante :

« La biomécanique de course a-t-elle un impact sur le mécanisme lésionnel des ischio-jambiers au football et en athlétisme »

Il est probable que l'augmentation des taux de blessures aux ischio-jambiers soit due à plusieurs facteurs (5, 40). Premièrement, le niveau élevé des matchs et l'exposition à la course à vitesse maximale accroissent le risque de blessures aux ischio-jambiers (46, 47). De plus, étant donné que la plupart des blessures à ce groupe musculaire surviennent lors d'une accélération de sprint et d'une course à vitesse élevée maximale (20), il semble logique que la biomécanique soit perçue comme un facteur potentiel contribuant à la tension mécanique des tissus et donc au développement des blessures. Ces hypothèses serviront de point de départ pour notre recherche et orienteront la conception de notre méthodologie d'investigation.

La revue de la littérature permet d'examiner un large éventail des travaux réalisés sur le sujet, en plus d'identifier les lacunes et/ou le manque d'études de terrain actuelles. En effet, cette revue de littérature nous a fourni un fondement solide pour notre projet de recherche et a orienté notre approche méthodologique. Ainsi en tant que futur professionnel de santé, s'intéresser de près à cette approche pourrait ensuite permettre de proposer des traitements et une prévention adaptée à ce type de population.

Afin de répondre à cette problématique professionnelle, nous définirons tout d'abord le cadre conceptuel en présentant les muscles ischio-jambiers, avant de décrire les lésions qui les affectent et leurs implications spécifiques dans le contexte sportif ; en établissant une définition de la biomécanique de course ; puis en présentant l'ensemble des critères qui sont retrouvés dans la littérature. Nous expliquerons les raisons pour lesquelles la revue de la littérature a été privilégiée. Nous développerons la méthode, et les résultats seront exposés. Ces derniers seront analysés et confrontés à la littérature dans la discussion. Enfin, les perspectives de ce travail ainsi que ses apports pour notre pratique future seront présentées dans la conclusion.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

2. Cadre conceptuel

1.1. Rappels anatomiques

Les ischio-jambiers (IJ) sont constitués de trois muscles longs et forment la loge postérieure de la cuisse. Du latéral au médial nous retrouvons : le biceps fémoral (BF), le semi-tendineux (ST) et le semi-membraneux (SM). Tous trois sont des muscles bi-articulaires (excepté le chef court du BF) qui croisent les articulations de la hanche et du genou. Lorsqu'ils se contractent, ils ont comme actions principales une extension de la hanche ainsi qu'une flexion du genou. Ils sont aussi rotateurs au niveau des deux articulations (55, 56). En position statique, ils contribuent à la stabilisation du segment jambier et au maintien de la posture debout grâce à leur tonus de base. En chaîne cinétique fermée, ils assurent la rétroversion du bassin en synergie avec le grand fessier et jouent donc un rôle de sangle postérieure. Ils sont tous innervés par le nerf sciatique.

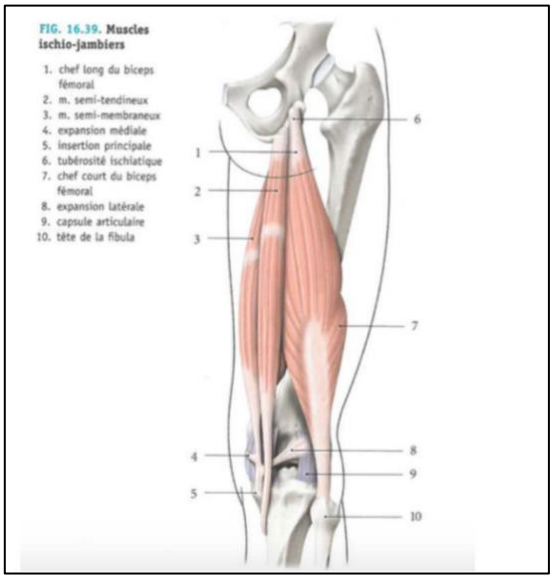


Figure 1 : Illustration des 3 chefs musculaires des ischio-jambiers (Kamina 2013)

Ces muscles se caractérisent par de longs tendons proximaux et distaux, ainsi que par de vastes jonctions myotendineuses s'étendant jusqu'aux ventres musculaires. Cette structure favorise la transmission et la dissipation des forces lors des phases de contraction et de relâchement. La configuration spécifique de ces tendons contribue à un effet « ressort » significatif, optimisant ainsi la performance sportive. Cependant, cette même particularité accroît également le risque de blessure.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Ce groupe musculaire a la particularité de posséder une grande proportion de fibres de type II (51 à 58%) par rapport aux fibres de type I. Cela signifie donc qu'ils sont plus puissants que résistants. De plus, les IJ sont des muscles pennés, c'est-à-dire que l'angle d'attaque des fibres musculaires sur le tendon est oblique. Or, les muscles pennés ont une capacité de raccourcissement qui est fonction de la longueur des fibres musculaires. Cette capacité de raccourcissement est donc moins importante que celle des muscles dont leurs fibres sont parallèles au tendon. Notons tout de même que les muscles pennés ont une force de contraction plus élevée que les muscles fusiformes.

1.1.1. Muscle biceps fémoral

Le biceps fémoral (BF) est le muscle le plus latéral du compartiment postérieur de la cuisse. Il est constitué de deux chefs, long et court. La portion longue est bi-articulaire et naît par un tendon commun avec le ST, sur la partie inféro-médiale de la partie haute de la tubérosité ischiatique (65, 66). Contrairement au semi-membraneux et au semi-tendineux, la longue portion du biceps fémoral (BFlp) possède une attache supplémentaire au **ligament sacrotubéral**, le reliant directement à **l'articulation sacro-iliaque** (67). La portion courte prend son origine par une lame tendineuse sur la lèvre latérale de la ligne âpre, au niveau de la diaphyse fémorale. Le chef long, oblique en bas et latéralement, se prolonge dès le milieu de la cuisse par le tendon terminal. Le chef court, quant à lui, est oblique en bas et en arrière et se termine sur la face antérieure du tendon terminal. Une fois réunis, les deux chefs vont se terminer sur la face latérale de la tête de la fibula et par des expansions sur le condyle latéral du tibia ainsi que sur le fascia crural.

Les deux chefs sont fléchisseurs mais aussi rotateurs latéraux du genou. Le chef long, étant bi-articulaire, participe à l'extension de la cuisse. En phase statique, il assure un maintien de la hanche lors de l'antéflexion du tronc et une stabilité de l'articulation fémoro-tibiale (55, 56)

Il est important de souligner **cette connexion tendino-ligamentaire** entre **le BFlp** et **le ligament sacro-tubéral**, suggérant que le BFlp pourrait jouer un rôle dans la stabilisation du bassin et de l'articulation sacro-iliaque, tout en étant lui-même influencé par leur fonctionnement. Par conséquent, **toute modification de la cinématique du bassin et de l'articulation sacro-iliaque pourrait affecter la répartition des contraintes au sein du BFlp** (67, 68, 69).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

1.1.2. Muscle semi-tendineux

Le semi-tendineux (ST) est localisé en position médiale par rapport au BF dans le compartiment postérieur de la cuisse. Le ST naît sur la face postérieure de la tubérosité ischiatique par un tendon commun avec le BF. Il descend médialement et se prolonge au tiers inférieur de la cuisse par un tendon qui longe la face postérieure des condyles médiaux du fémur et du tibia. Il prend sa terminaison sur la partie supérieure de la face médiale du tibia. Ainsi, le ST fait partie d'un groupe de muscles dénommé « les muscles de la patte d'oie » avec le sartorius et le gracile, de par leurs insertions sur le tibia proches malgré leurs loges musculaires différentes.

Le semi-tendineux est fléchisseur et rotateur médial du tibia sous le fémur en plus d'être extenseur de hanche (55, 56).

1.1.3. Muscle semi-membraneux

Le semi-membraneux (SM) naît en avant et au-dessus de la tubérosité ischiatique. Étalé et fusiforme, il se prolonge au tiers inférieur de la cuisse par un tendon qui longe la face postérieure du condyle médial du fémur. Le SM se termine principalement sur la face postérieure du condyle médial du tibia. Notons qu'il possède deux expansions ; l'expansion médiale, ou tendon réfléchi, qui longe la face médiale du condyle médial du tibia sous le ligament collatéral tibial pour se fixer à la partie antérieure de ce condyle. L'expansion latérale, ou ligament poplité oblique, se dirige latéralement et en haut pour se terminer sur la ligne intercondylaire, le condyle latéral fémoral et la capsule articulaire adjacente.

Le SM possède les mêmes fonctions que le ST. Il convient d'ajouter qu'il contribue à tendre la capsule articulaire grâce à ses expansions. (55, 56)

1.1.4. Fascias

Les fascias sont des membranes fibro-élastiques qui enveloppent, soutiennent et séparent les muscles et autres structures internes du corps. Ils sont composés de tissu conjonctif très riche en fibres de collagène. Ils jouent un rôle crucial dans la transmission des forces musculaires, la proprioception et la coordination des mouvements. Dans le contexte des muscles IJ, le fascia postérieur de la cuisse est particulièrement important. Celui-ci relie les corps musculaires entre eux et aux structures adjacentes, facilitant la synchronisation musculaire.

Notons que les IJ sont un groupe musculaire qui présente une grosse composante fibreuse. En effet, le SM est constitué en grande partie d'aponévrose et le ST est riche en tissu

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

tendineux. Ainsi, la structure histologique des IJ, forte en tissu conjonctif, en font des muscles voués à la rétraction, ce qui leurs confèrent une raideur passive permettant une économie d'énergie, mais **réduisant nettement leur potentiel d'extensibilité**.

En ce qui concerne le tissu conjonctif adjacent, des études ont démontré que la flexibilité des IJ peut influencer d'autres régions du corps par le biais des chaînes myofasciales. Par exemple, une recherche a mis en évidence un lien entre la souplesse des ischio-jambiers et l'endurance des muscles fléchisseurs profonds du cou, suggérant **une interconnexion fasciale** entre les membres inférieurs et la région cervicale. Cette découverte clinique préliminaire renforce l'hypothèse de l'existence d'un réseau myofascial reliant ces deux régions du corps (70). Cependant, des études de haute qualité sont nécessaires afin d'évaluer correctement la biomécanique du tissu myofascial et son rôle dans la technique du sprint.

1.2. La lésion myo-aponévrotique

1.2.1. Définition et physiopathologie

Lors d'une déchirure musculaire, les athlètes rapportent généralement une douleur soudaine, aiguë et vive, souvent comparée à un pincement au niveau de la cuisse (58, 59, 60). Certains mentionnent avoir perçu un « pop » au moment de la blessure et présentent une altération du schéma de marche due à la douleur ressentie lors de la flexion du genou et/ou de l'extension de la hanche. Cela se manifeste fréquemment par une démarche en « jambe raide » (60).

La structure bi-articulaire des IJ est considérée comme un facteur majeur de leur vulnérabilité aux déchirures musculaires. En effet, d'autres muscles traversant deux articulations, tels que le droit fémoral, les grands et longs adducteurs ou encore les gastrocnémiens, sont également sujets à des lésions fréquentes lors de la pratique sportive (61).

On distingue les traumatismes extrinsèques, dus à un choc direct, des traumatismes intrinsèques, plus fréquents, qui surviennent lorsque les contraintes mécaniques excèdent la résistance du tissu musculaire. Les lésions intrinsèques touchent majoritairement les jonctions myo-aponévrotiques et myo-tendineuses, zones structurellement plus vulnérables du muscle, tandis que les lésions extrinsèques se situent plutôt au niveau du corps musculaire (62). La majorité des lésions musculaires sont de type intrinsèque et surviennent sans contact direct (63). Une étude fondée sur l'imagerie par résonance magnétique (IRM) a révélé que les lésions se situent principalement au niveau des jonctions myo-tendineuses et myo-

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

aponévrotiques, avec une prévalence de 39 % au sein des jonctions myo-tendineuses, qui apparaissent comme les plus vulnérables (64).

1.2.2. Mécanisme lésionnel

Les blessures des IJ surviennent généralement lors des phases d'accélération et de course à grande vitesse (53)

Les muscles IJ sont fréquemment utilisés de manière excentrique. Cette demande les expose à des risques de blessures importants. On identifie surtout deux types de mécanismes de lésion qui affectent les muscles de la région postérieure de la cuisse. Askling a décrit ces deux types de mécanismes, l'un se produisant lors d'une course rapide, en particulier pendant un sprint, et l'autre lors d'un étirement excessif des fibres musculaires désigné par le terme anglophone « overstretch » (63, 74).

Déjà, un cycle de course complet comprend deux phases principales : la phase d'appui (pied en contact avec le sol) et la phase de balancement (pied sans contact avec le sol). Ces deux phases principales peuvent être divisées en sous-phases : appui précoce (freinage), appui tardif (propulsion), balancement précoce, balancement moyen et balancement tardif (préactivation)

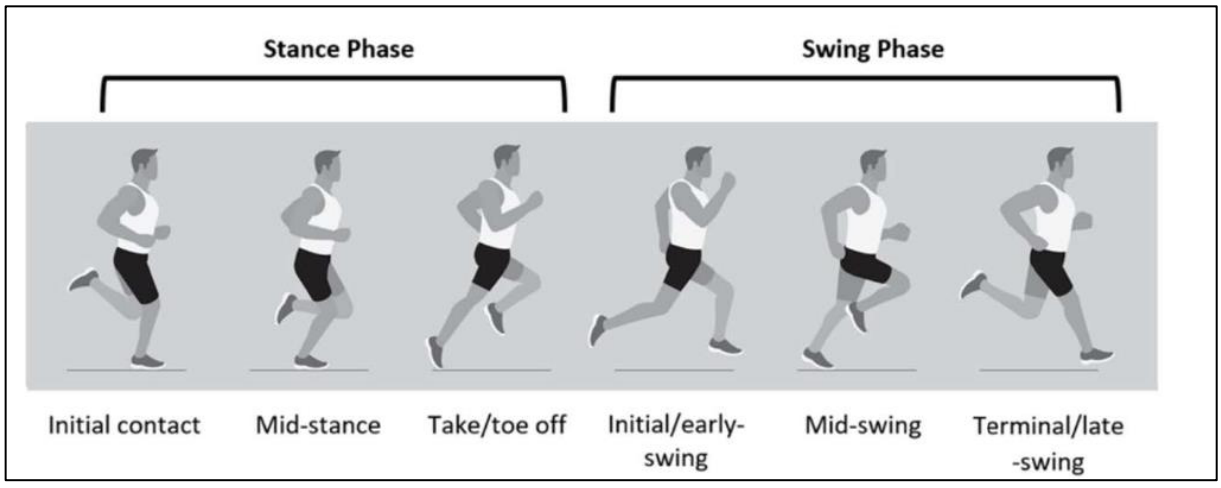


Figure 2 : Les phases du sprint ; phase d'appui (stance phase) et phase oscillante (swing phase)

Au cours d'un sprint, les IJ sont sollicités tout au long de la course. Cependant, une augmentation significative de l'activation est notée à la fin de la phase d'oscillation (swing tardif), où les IJ sont particulièrement exposés à de fortes contraintes mécaniques durant cette phase. En effet, avant la phase de contact au sol, les IJ sont grandement sollicités et étendus en conséquence. Au cours de cette étape, ils parviennent à leur longueur maximale. Ils

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

participent également à l'absorption d'énergie **lors de la décélération du membre oscillant.** Autrement dit, les IJ subissent des forces excentriques considérables pour maintenir l'extension du genou.

Ces forces peuvent surpasser les capacités physiologiques du muscle. Selon Verrall et Dolman dans une étude publiée en 2016, « Les lésions musculo-squelettiques résultent de l'incapacité à contrer les forces appliquées lors de l'allongement » (75)

Il convient de noter que le BFlp est le muscle principalement touché par les blessures lors d'une course à haute vitesse (76). Divers facteurs peuvent expliquer cette prévalence par rapport aux autres muscles IJ. Ce muscle subit le plus grand étirement pendant la phase de fin d'oscillation (77). En effet, lors du passage d'une vitesse de 80 % à 100 % de la vitesse maximale, l'activité du BF pendant la phase terminale d'oscillation augmente en moyenne de 67% tandis que celle des SM et ST augmente de 37% (80). Avec cette augmentation d'activité, l'amplitude de l'étirement maximal est significativement plus grande pour le BFlp. Cela peut être expliqué par le fait que le genou soit légèrement fléchi pendant la phase de suspension, le bras de levier plus court des IJ latéraux, en particulier du BFlp, entraîne un étirement accru de ce muscle par rapport à la position verticale.

De plus, il faut comprendre que le ST présente l'activité électromyographique la plus élevée durant la phase d'oscillation terminale. Il doit gérer un étirement conséquent des tendons musculaire couplé à un travail excentrique accru. Ce chef musculaire agit en synergie avec le BFlp. En effet lorsque le ST est inapte à répondre en résistance et en production de force lors de charges excentriques intenses, le BF entre en jeu pour tenter d'équilibrer ce déficit fonctionnel (78).

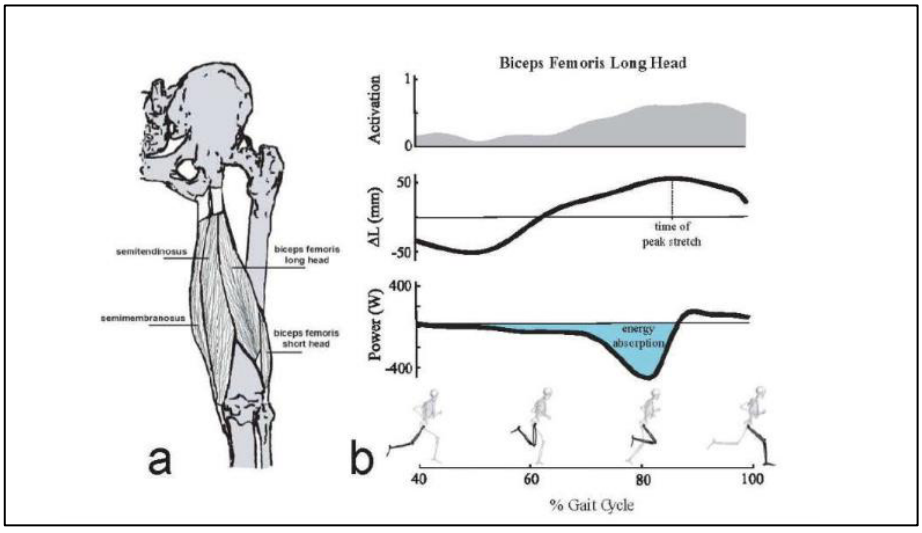


Figure 3 : L'activation de la longue portion du biceps fémoral durant la phase oscillation

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Toutefois, le BFlp est la portion des IJ qui possède la plus petite longueur fasciculaire. Ceci explique son inaptitude à répondre à un étirement excessif et à emmagasiner la grande quantité d'énergie produite lors de la phase finale excentrique du cycle de course. (78) **De faibles longueurs de fascicules concourent à la prédisposition d'apparition des lésions musculaires aux IJ**.

Ainsi, le sprint est considéré comme une activité à risque de lésion musculaire en raison des forces négatives exercées sur les IJ. Aussi, ce groupe musculaire doit travailler avec une forte intensité mais également à une vitesse très élevée. Les meilleurs sprinteurs peuvent atteindre, lorsqu'ils sont lancés à pleine vitesse, une cadence de 5 foulées par seconde (107).

1.2.3. Classification et diagnostic

La classification des LMA prend en compte plusieurs critères, notamment le nombre de faisceaux musculaires lésés, la présence d'une atteinte du tissu conjonctif, ainsi que la survenue ou non d'un hématome. Une déchirure musculaire des ischio-jambiers se manifeste généralement par une douleur vive et aiguë, souvent décrite par les patients comme une sensation de coup de poignard au niveau de la face postérieure de la cuisse. Selon la gravité de la lésion, le muscle peut perdre sa capacité à se contracter

La classification de Durey et Rodineau (1990) est plus appropriée aujourd'hui puisqu'elle se base sur l'aspect histologique et s'intéresse aux 5 stades lésionnels musculaires allant de la simple courbature à la déchirure musculaire complète (71). Elle est complétée avec les éléments échographiques correspondant à chaque stade décrit par Brasseur (72).

Grade	Terme clinique couramment utilisé	Apparence histologique	Apparence échographique
Grade 0	«Courbature»	Atteinte réversible de la fibre musculaire. Pas d'atteinte du tissu conjonctif de soutien	Aspect hyperéchogène global de la loge musculaire
Grade 1	«Contracture»	Atteinte irréversible de la fibre musculaire. Pas d'atteinte du tissu conjonctif de soutien	Zones floues hyperéchogènes sans désorganisation des fascicules musculaires
Grade 2	«Elongation»	Atteinte irréversible d'un nombre réduit de fibres musculaires. Atteinte du tissu de soutien	Zones floues hyperéchogènes avec flammèches de désorganisation des fascicules musculaires
Grade 3	«Claquage»	Atteinte irréversible d'un nombre important de fibres musculaires. Atteinte du tissu de soutien + hématome	Collections liquidiennes au niveau des jonctions myotendineuses ou myoaponévrotiques
Grade 4	«Rupture»	Rupture partielle ou totale d'un muscle	Lésion myotendineuse ou myoaponévrotique complète avec rétraction

Figure 4 : Classification des lésions musculaires selon Durey et Rodineau

En 2012, une classification issue d'un consensus international a été établie, intégrant davantage d'éléments pour une meilleure catégorisation des diverses lésions musculaires (73).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Dans le cas d'une LMA, un œdème peut apparaître au niveau du muscle lésé, accentuant la douleur et la gêne fonctionnelle (80). Toute déchirure d'un muscle peut retentir sur chacun des éléments qui l'entourent. En effet, on peut observer par exemple des arrachements osseux, parfois masqués par un œdème apparu dans le muscle. Un hématome important peut aussi comprimer d'autres zones, notamment parce que les aponévroses autour du muscle sont limitées dans leur élasticité. Ainsi les nerfs, vaisseaux sanguins et lymphatiques, qui parcourent le muscle, peuvent être comprimés et lésés suite à une déchirure musculaire.

Le diagnostic d'une lésion des IJ repose sur l'examen clinique réalisé par le kinésithérapeute ou le médecin du sport qui inclut une triade diagnostique comprenant : palpation, étirement contraction musculaire.

Les examens d'imagerie sont souvent nécessaires pour confirmer le diagnostic et préciser l'étendue de la lésion. L'échographie est l'examen de première intention, car elle permet d'évaluer la structure musculaire et d'identifier la présence d'un hématome ou d'une désorganisation des fibres musculaires. L'IRM peut être indiquée pour déterminer avec plus de précision le degré de lésion et la localisation exacte de l'atteinte. Dans certains cas, notamment lorsqu'un arrachement osseux est suspecté, une radiographie peut être prescrite. Toutefois, ces examens doivent être réalisés 48 heures après la lésion, car une évaluation trop précoce pourrait être faussée par la réaction inflammatoire aiguë du muscle encore "à chaud". Ainsi, une prise en charge précoce et adaptée, associant évaluation clinique rigoureuse et examens d'imagerie ciblés, est essentielle pour optimiser la récupération et minimiser le risque de récidive des blessures aux IJ.

1.2.4. Recommandations

La cicatrisation musculaire suit trois étapes essentielles : l'inflammation, la reconstruction tissulaire et le remodelage. La phase inflammatoire (J0 à J3) se caractérise par la rupture des fibres musculaires, la nécrose et une réponse inflammatoire. Ensuite, la phase de reconstruction (J3 à J14) permet l'élimination des tissus nécrosés, la régénération des fibres musculaires et la formation du tissu cicatriciel. Enfin, la phase de remodelage (jusqu'à J21) assure la maturation des fibres et la restauration progressive des capacités fonctionnelles du muscle.

En cas de lésion musculaire, le protocole « PEACE & LOVE » est recommandé dès la phase aiguë pour limiter la douleur, réduire l'inflammation et favoriser la cicatrisation. L'application de glace doit être réalisée sans contact direct avec la peau mais celle-ci reste controversée

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

en raison de sa capacité anti-inflammatoire (108, 109, 110), limitant ainsi la cicatrisation des tissus atteints. La compression et l'élévation facilitent le drainage de l'œdème et accélèrent la récupération.



Figure 5 : Protocole PEACE & LOVE issu de la Clinique du Coureur

Le traitement kinésithérapique est indispensable et repose sur une rééducation progressive adaptée à la gravité de la blessure (80). Dans un premier temps, un travail excentrique à faible intensité dans les courses moyennes et internes, est mené afin de permettre un bon positionnement et une meilleure cicatrisation des fibres musculaires. La réadaptation à l'effort concentrique est progressive, avec un focus sur des exercices spécifiques à la discipline sportive. Le retour au sport n'est envisagé que lorsque la force, la souplesse et la coordination sont pleinement restaurées. En cas de désinsertion musculaire complète, une intervention chirurgicale sera nécessaire.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

3. Méthodes

Pour répondre à notre question de recherche, nous avons réalisé une revue de la littérature afin d'interroger l'ensemble de la littérature scientifique. Pour un mémoire de recherche, ce type d'étude consiste à sélectionner et traiter les informations de manière rigoureuse à partir de plusieurs bases de données tout en évaluant la pertinence, la qualité et la fiabilité des informations scientifiques concernant le sujet étudié. La recherche d'articles dans la littérature scientifique a été la première étape pour aborder notre problématique. En amont, nous avons prédéfini des mots clés afin de repérer ces articles qui ont ensuite été classés. Il y a quelques éléments qui ont été intégrés dans cette revue de littérature, rédigée en respectant les critères du modèle PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses guidelines) traduites en français (Gedda, 2015) (Annexe I).

3.1. Description de la stratégie de recherche

3.1.1. Bases de données

Les trois bases de données scientifiques interrogées pour sélectionner les études, sur une période allant de janvier à septembre 2024, étaient :

- PubMed : principale base de références d'articles dans les domaines des sciences biomédicales et de la santé, dont la kinésithérapie ;
- ScienceDirect : base de données de revues pluridisplinaire ;
- Cochrane Library : base de données spécialisée dans la médecine factuelle (evidence-based medicine).

Ces trois bases de données ont été les seules sources d'informations de recherche. D'autres bases de données, comme PEDro ou Lissa, ont été explorées mais n'ont fourni aucun résultat pertinent en lien avec notre équation de recherche. Les rares articles recensés sur ces plateformes ont été exclus car ils ne répondaient pas aux critères d'inclusion établis.

Le moteur de recherche **Pubmed**, étant le principal moteur de recherche de données bibliographiques dans le domaine de la médecine, a été utilisé pour rechercher les termes MeSH afin d'obtenir des synonymes de ces mots-clés. Cela nous a permis d'obtenir une équation de recherche la plus pertinente possible afin de choisir les articles les plus adaptés au sujet de ce mémoire.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

3.1.2. Critères d'éligibilité

Pour l'inclusion d'articles, plusieurs critères d'éligibilité ont été sélectionnés :

- Les études de cohorte prospectives et les essais comparatifs randomisés avec un niveau de recommandation plus élevé de la HAS (Haute autorité de santé) par rapport aux études cas-témoins et aux études transversales.
- Les revues de la littérature et méta-analyses des essais cliniques randomisés
- Les études publiées en anglais ont été privilégiées afin de garantir un accès optimal aux publications disponibles, n'ayant pas la maîtrise d'autres langues.
- Les articles publiés à partir de 2014 ont été inclus afin de prendre en compte les publications les plus récentes. Les études de 2013 étant déjà pertinentes (28, 57, 59, 74, 77, 94) l'objectif était d'explorer les avancées réalisées par la suite.
- Concernant la population, les études sur les athlètes pratiquant du football ou du sprint à niveau amateurs et/ou professionnels.
- Les interventions concernent principalement des traitements, des programmes d'entraînements (analyse de la technique de course par exemple) ou encore des expositions contrôlées.
- Les résultats obtenus doivent évaluer le taux d'incidence des lésions des IJ ou démontrer une analyse biomécanique / préventive sur ce type de blessures.

Tableau I – Critères d'inclusion et exclusion

	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
Population	Athlètes pratiquant le football (tel qu'il est décrit et organisé par la FIFA) ou le sprint (athlétisme) amateur ou professionnel	Joueurs de football Gaélique Joueurs de football Américain Futsal Athlètes pratiquant une distance au-delà du 400 mètres
Pathologies	Lésion aux ischio-jambiers	Autres lésions musculaires du membre inférieurs
Intervention	Traitements et programmes d'entraînement spécifiques comparés à l'absence de prévention ou de traitement ciblé des ischio-jambiers	/
Outcomes	**Critère d'évaluation principal ;** Taux d'incidence des LMA en lien avec le schéma de course, **réduction de l'incidence des blessures, paramètres biomécaniques identifiés**	/

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

	Critères d'évaluations secondaires ; Taux de récidives des lésions, temps de récupération après une lésion, qualité de la performance après récupération	
Types d'articles et date de publication	Les études de cohorte et les essais contrôlés randomisés Les articles publiés à partir de 2014. Revues de la littérature et méta-analyses.	Les études cas-témoins, transversales, celles traitant des lésions musculaires de l'ensemble du membre inférieur et la littérature grise Les articles indisponibles, introuvables en version complète ou encore payants…

Pour être inclus les articles doivent être rédigés en anglais. Les publications dans une autre langue sont écartées. Les articles dont la version complète n'est pas disponible ou introuvable ne sont pas conservés.

De plus, pour qu'un écrit soit inclus, il doit porter sur des athlètes pratiquant le sprint ou le football et établir un lien avec les lésions des IJ.

Les critères de non-inclusion ont été les études cas-témoins et transversales mais aussi la littérature grise, car jugés moins pertinentes. Ainsi, cela revient à écarter les documents suivants :

- Rapports non publiés.
- Thèses et mémoires.
- Actes de conférences.
- Prépublications (preprints).
- Documents de travail.
- Rapports d'agences gouvernementales.
- Publications internes d'organisations.
- Communications personnelles.

Nous avons utilisé des filtres dans les bases de données pour limiter les résultats aux articles évalués par des pairs. Par exemple, dans PubMed, nous avons utilisé le filtre « Article type » pour inclure uniquement les « Review », « Systematic Review », « Meta-Analysis » et « Randomized Controlled Trial ».

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Les études faites sur des patients pratiquant un autre sport que le football à onze tel qu'il est pratiqué en France (football Américain, football Australien, football Gaélique...) ainsi que les athlètes pratiquant une distance supérieure à 400 mètres (au-delà, World Athletics ne considère pas la course comme du sprint) ont été également écartées, car ne répondant pas au sujet de ce mémoire, en plus de celles traitant de lésion musculaire de l'ensemble du membre inférieur.

3.1.3. Mots clés et équation de recherche

L'utilisation de l'acronyme PICO (population, intervention, comparateur, outcome) nous a permis de repérer les mots clés.

Tableau II - Définition des critères PICO

Critère PICO	Définition	Mots-clés
Population / Patients	Athlètes pratiquant le football ou le sprint en athlétisme	• **Français :** Athlètes, joueurs de football, sprinteurs • **Anglais :** Athletics, football players, soccer players, sprinters
Intervention	Analyse de la biomécanique / technique de course	• **Français** : Biomécanique, analyse biomécanique • **Anglais** : biomechanics, biomechanical analysis
Comparateur	/	/
Outcome	Taux d'incidence des LMA en lien avec le schéma de course, **réduction de l'incidence des blessures, paramètres biomécaniques identifiés**	• **Français :** Déchirure des ischio-jambiers, Lésion myo-aponévrotique des ischio-jambiers, blessure aux ischio-jambiers • **Anglais :** Hamstring strain, hamstring injury

Par la suite, en associant les mots clés aux opérateurs booléens « AND », « OR » et « NOT », nous avons pu établir et affiner notre équation de recherche.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

- **L'opérateur « AND »** est positionné entre deux mots clés de différents éléments du modèle PICO.
- **L'opérateur « OR »** entre deux mots d'un même élément PICO, ces mots étant généralement synonymes.
- **L'opérateur « NOT »** permet de ne pas inclure le ou les mots clés choisi et par conséquent d'éliminer des articles qui n'auraient pas de lien direct avec mon sujet.

Un filtre permettant d'obtenir des articles publiés entre 2014 et 2024 a été utilisé afin d'obtenir les avancées scientifiques, ainsi qu'un filtre permettant d'avoir des articles en anglais.

Notre équation de recherche est basée sur la méthode PICO, tout comme nos critères d'inclusion / exclusion et nos critères de jugements.

Nous avons employé l'équation suivante pour le site PubMed :

- (**football players OR soccer players OR sprinters OR athletics) AND (hamstring injury OR hamstring injuries OR hamstring strain OR hamstring strains) AND (Biomechanics OR biomechanical analysis) NOT (anterior cruciate ligament)**

Nous avons exclu toutes les études en liens avec le ligament croisé antérieur, ce dernier ne répondant pas à notre sujet.

Il a été nécessaire d'appliquer nos mots clés comme **MeSH terms** afin d'avoir une liste complète d'articles où les notions principales abordées traitent de notre sujet de recherche et apparaissent dans les résultats.

Enfin, nous avons utilisé deux grilles ou échelles (PEDro et SANRA) pour évaluer la qualité méthodologique des études.

3.1.4. Stratégies de sélection des articles

La stratégie de sélection a été effectuée par une unique personne (Bilal Tlili BT) à l'aide de la méthode PRISMA. En théorie il serait essentiel que ce choix des études soit fait par deux personnes indépendantes. Pour ce mémoire, la sélection n'a été effectuée que par l'auteur principal (l'étudiant BT) et ce biais sera donc mentionné dans les limites de l'étude.

La première étape de cette sélection a été d'interroger les bases de données scientifiques avec l'équation de recherche décrite ci-dessus (cf chapitre 3.1.3). Les articles sélectionnés dans les 3 bases de données ont été exportés dans le logiciel de gestion de références Zotero.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

C'est un gestionnaire bibliographique gratuit destiné aux rédacteurs d'études scientifiques (Coar & Sewell, 2010). Enfin, le processus de sélection a été effectué en plusieurs étapes : triage, éligibilité et inclusion dans notre revue de la littérature. Dans un premier temps, a eu lieu l'élimination des doublons. Puis nous avons effectué une pré-sélection à partir du titre et du résumé. Enfin, l'analyse complète du texte, et en prenant en compte les critères fixés ci-dessus, a permis de finaliser notre sélection d'études à 7 documents. Le diagramme de flux correspondant est présenté dans la figure 6 de la partie **[4. Résultats].**

3.2. Méthodologie d'analyse de la littérature

3.2.1. Extraction des données

L'extraction des données a été réalisée de manière indépendante. L'objectif de cette étape était de relever les caractéristiques générales des études pour répondre de manière pertinente à la recherche. Afin de permettre une extraction optimale, nous avons réalisé une fiche résumée dans un tableau pour chacune des études retenues. Cette fiche nous a permis de recueillir les informations essentielles en lien avec l'article telles que le titre, les auteurs et la date de publication, ainsi que le design, l'objectif et les résultats de l'étude. Concernant la population, les données extraites portaient principalement sur la spécificité des études incluses, à savoir si elles se concentraient sur des sprinters ou des footballeurs, Ensuite, nous avons listé les critères de jugement des études en lien avec ceux déterminés pour notre revue, l'outil d'évaluation et les paramètres mesurés. Pour terminer, nous avons décrit les résultats de chaque étude ainsi que le risque de biais en lien avec le score PEDro et l'échelle SANRA.

3.2.2. Analyse des données

Après lecture des articles, les données ont été analysées et synthétisées par une seule et même personne, dans des tableaux récapitulatifs individuels et collectifs, et sous forme d'un texte narratif. Les tableaux sont présentés dans la partie **[4. Résultats].** En corrélation avec les critères de jugements recueillis dans les articles, nous avons réalisé une analyse descriptive des résultats en hiérarchisant les informations, de la plus importante à la moins importante.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

3.2.3. Évaluation de la qualité méthodologique

Dans le cadre d'une revue de la littérature, les biais pouvant être rencontrés sont les suivants : sélection, informations ou classement et confusion.

Un **biais de sélection** est une erreur systématique induite dans une étude à cause des méthodes adoptées pour choisir les participants à l'étude.

Un **biais d'information/ de classement** est « une erreur systématique induite lorsque la mesure ou l'observation d'un phénomène est incorrecte et conduit à mal classer les sujets en malades/non malades ou en exposés/non exposés ». Cette erreur est quasiment inévitable puisqu'aucun outil de mesure (interrogatoire, examen, test) n'est parfait.

Enfin, **un biais de confusion** est un biais entraîné par l'absence de la prise en compte d'un tiers-facteur pouvant influencer la relation entre l'exposition et la maladie.

Tableau III – Les différents biais

Les biais		
Facteurs de sélection	Facteurs d'informations/classement	Facteurs de confusion
Sélection des articles : - 2014/2024 ; études récentes adapté au sujet - Non sélection des études inaccessibles (payantes…) - Fiabilité (ECR, non retenu des articles avec type <B) - Par une seule personne au lieu de deux **Contenu des articles :** - Attrition (différences entre les groupes, sorties, interruptions) : *détection : évaluateurs en insu *Performance : protocole d'intervention ? - Recrutement, échantillonnage - Durée, perdus de vues - Randomisation bien suivie (répartition...)	**Contenu des articles :** - Biais de suivi : différence PEC groupe traité et contrôle (apports, encouragements...) - Biais de subjectivité (connaissance facteur exposition) - Biais de non réponse ou refus des patients - Biais de mémoire (souvenir ...)	**Contenu des articles :** - Pas de groupe de référence (contrôle) - Groupes homogènes (exposition identique...)

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Les niveaux de preuve des études choisies ont été décrits en fonction des recommandations de bonne pratique définis par la Haute Autorité de santé (2013) (Tableau IV).

Tableau IV : Grades des recommandations (Haute Autorité de santé, 2013)

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
A Preuve scientifique établie	Niveau 1 - essais comparatifs randomisés de forte puissance ; - méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ; - analyse de décision fondée sur des études bien menées.
B Présomption scientifique	Niveau 2 - essais comparatifs randomisés de faible puissance ; - études comparatives non randomisées bien menées ; - études de cohortes.
C Faible niveau de preuve scientifique	Niveau 3 - études cas-témoins. Niveau 4 - études comparatives comportant des biais importants ; - études rétrospectives ; - séries de cas ; - études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).

La qualité méthodologique des études choisies pour notre revue de la littérature va être évaluée par deux grilles ou échelles : PEDro et SANRA.

La qualité méthodologique des essais contrôlés randomisés (ECR) sera évaluée à l'aide de **l'échelle PEDro**. Cette échelle contient 11 items (Maher et al., 2003) et est validée pour l'étude de la qualité des essais contrôlés randomisés (de Morton, 2009). Ces 11 critères d'évaluation permettent de relever l'existence de potentiels biais dans l'étude (biais de sélection, biais d'attrition, biais de mesure...). Cette échelle a permis d'évaluer la validité de l'étude avec 8 critères destinés à la validité interne (critères 2 à 9) et 2 critères (critères 10 à 11) pour

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

l'interprétation des résultats. Le premier critère est relatif à la validité externe, c'est-à-dire l'applicabilité de l'étude (non comptabilisé dans le score final). Pour chaque critère, nous avons attribué des points uniquement s'il était clairement respecté. Si, ce critère n'était pas explicitement rédigé lors de la lecture de l'étude, alors le point n'était pas attribué. Le détail du score PEDro est à retrouver en annexe (Annexe IV).

L'échelle SANRA (Scale for the Assessment of Narrative Review Articles) est un outil validé permettant d'évaluer la qualité des revues narratives dans la littérature médicale. Développée pour pallier l'absence d'instruments spécifiques d'évaluation de ce type d'articles, cette échelle se compose de six critères principaux, chacun noté sur une échelle de 0 à 2 points : 0 : critère non rempli, 1 : critère partiellement rempli, 2 : critère totalement rempli. Le score total obtenu varie donc de 0 à 12, un score plus élevé reflétant une meilleure qualité de l'article. Dans le cadre de ce mémoire, cet outil a permis d'assurer une évaluation standardisée et rigoureuse de la qualité méthodologique des revues narratives analysées.

3.3. Description de l'analyse statistique

Une analyse statistique descriptive sera réalisée pour synthétiser les caractéristiques principales des études incluses dans cette revue de la littérature. Cette analyse comprendra la classification des types d'études (revues narratives, expérimentales…), la description des populations étudiées (taille des échantillons, sports pratiqués, genre), ainsi que les critères d'évaluation utilisés (incidence des lésions, paramètres biomécaniques…).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4. Résultats

4.1. Sélection des études

Le nombre de références identifiées au total était de 113 articles dans les 3 bases de données. 15 doublons ont été supprimés. Une fois cela terminé, nous avons procédé à la lecture des titres puis des résumés. 3 études publiées en diverses langues autres que l'anglais ont été exclues. 24 articles ne présentaient pas le modèle d'étude souhaité. 35 articles qui n'étaient pas en relation avec la question de recherche ont aussi été éliminés. Pour finir, 19 papiers ne correspondent pas aux critères PICO mentionnés auparavant et ont par conséquent été retirés. 10 articles ont été supprimés en raison du manque de disponibilité des résultats. En conclusion, tous les papiers éligibles ont été lus intégralement (figure 6).

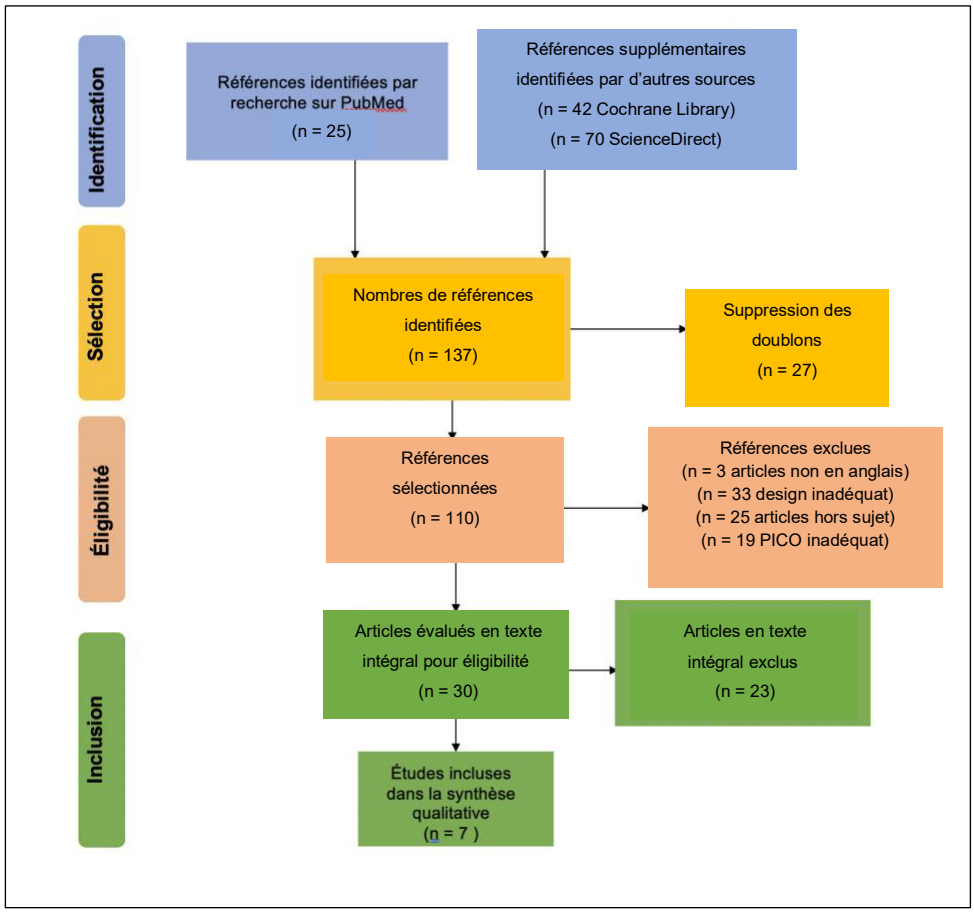


Figure 6 : Diagramme de flux selon la méthode PRISMA (Moher et al., 2009)

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.2. Études retenues

Suite au processus de sélection, 7 articles ont été retenus dans la synthèse qualitative et ont été analysés dans ce travail. Voici la liste des références de ces études, rédigée selon les normes APA (American Psychological Association, 2020), 7ème édition :

1) Bramah, C., Mendiguchia, J., Dos'Santos, T., & Morin, J.-B. (2024). Exploring the role of sprint biomechanics in hamstring strain injuries: A current opinion on existing concepts and evidence. *Sports Medicine, 54*(4), 783-793. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01925-x

2) Vicens-Bordas, J., Parvaneh Sarand, A., Beato, M., & Buhmann, R. (2024). Hamstring injuries, from the clinic to the field: A narrative review discussing exercise transfer. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 19*(8), 729-737. https://doi.org/10.1123/ijspp.2024-0049

3) Kalkhoven, J. T., Lukauskis-Carvajal, M., Sides, D. L., McLean, B. D., & Watsford, M. L. (2023). A conceptual exploration of hamstring muscle-tendon functioning during the late-swing phase of sprinting: The importance of evidence-based hamstring training frameworks. *Sports Medicine, 53*(12), 2321-2346. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01904-2

4) Kalema, R. N., Schache, A. G., Williams, M. D., Heiderscheit, B., Trajano, G. S., & Shield, A. J. (2021). Sprinting biomechanics and hamstring injuries: Is there a link? A literature review. *Sports, 9*(10), 141. https://doi.org/10.3390/sports9100141

5) Huygaerts, S., Cos, F., Cohen, D. D., Calleja-González, J., Guitart, M., Blazevich, A. J., & Alcaraz, P. E. (2020). Mechanisms of hamstring strain injury: Interactions between fatigue, muscle activation and function. *Sports, 8*(5), 65. https://doi.org/10.3390/sports8050065

6) Wan, X., Li, S., Best, T. M., Liu, H., Li, H., & Yu, B. (2021). Effects of flexibility and strength training on peak hamstring musculotendinous strains during sprinting. *Journal of Sport and Health Science, 10*(2), 222-229. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.08.001

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

7) Street, S. B., & Kaminski, T. (2020). Does the FIFA 11+ program prevent hamstring injuries in college-aged male soccer players? A critically appraised topic. *Journal of Sport Rehabilitation, 30*(1), 158-160.
https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0390

4.3. Caractéristiques des articles sélectionnés

4.3.1. Généralité et spécificité

À l'issue de notre processus de sélection des articles, nous avons retenu 7 papiers pour essayer de répondre à notre question de recherche. Il y a 6 revues de la littérature dont 2 revues critiques et 2 revues narratives, et un essai contrôlé randomisé.

Des tableaux individuels pour chaque étude ont été réalisés (tableau V à XI), ainsi qu'un tableau récapitulatif comportant les principales caractéristiques de toutes les études (tableau XII).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Exploring the Role of Sprint Biomechanics in Hamstring Strain Injuries: A Current Opinion on Existing Concepts and Evidence
Auteurs et date	Bramah et al. ; 2023
Schéma d'étude	RDL : Revue narrative
Population	L'étude se concentre sur les athlètes pratiquants des sports impliquant le sprint (football et athlétisme).
Critères d'exclusions	Ne mentionne pas de critères spécifiques d'exclusion.
Définition de « hamstring injury »	Dans un modèle biomécanique de causalité des blessures, **une lésion musculaire résultant d'un dépassement de la capacité tissulaire à résister à une contrainte mécanique appliquée.**
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Biomécanique du sprint influençant la contrainte mécanique sur les IJ. Fatigue neuromusculaire, antécédent de lésion, âge, asymétrie de force, force excentrique, architecture musculaire, propriétés mécaniques du tissu musculaire. Facteurs influençant **le contrôle lombo-pelvien, l'inclinaison antérieur du bassin, la flexion du tronc vers l'avant, la flexion latérale du tronc et l'angle maximal de la flexion de hanche.** Sur des données théoriques ; mécanique de la face arrière (back-side mechanics), sur-foulée et l'extension lombaire.
Méthode(s) d'évaluation	Synthèse des données issues des études biomécaniques et épidémiologiques ; analyse qualitative des facteurs de risque à partir des études existantes.
Objectif	**Discuter du lien entre la mécanique de la course de sprint et la lésion des IJ, tout en classant les paramètres biomécaniques selon la qualité des preuves dont ils sont issus.**
Résultats	Le rôle de la mécanique de course de sprint dans l'influence de la tension des tissus musculaires des IJ est appuyé par **les études d'anatomie fonctionnelle et de modélisation biomécanique.** **Dans les études empiriques actuelles,** aucun paramètre biomécanique isolé n'a été identifié comme un facteur unique de risque de lésion des IJ. **C'est sûrement l'interaction entre de multiples caractéristiques cinématiques et cinétiques qui influence l'ampleur de la tension appliquée conduisant au développement de lésions des IJ.** **→ Absence actuelle de méthodes établies sur le terrain pour évaluer la biomécanique de la course à haute vitesse.**

Tableau V : Caractéristiques de l'étude de Bramah et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Hamstring Injuries, From the Clinic to the Field: A Narrative Review Discussing Exercise Transfer
Auteurs et date	Vicens-Bordas et al. ; 2024
Schéma d'étude	RDL : Revue narrative
Population	Se concentre sur les athlètes pratiquants des sports impliquant le sprint et ayant une blessure aux IJ.
Critères d'exclusions	Ne mentionne pas de critères spécifiques d'exclusion.
Définition de « hamstring injury »	**Les blessures aux IJ surviennent pendant l'accélération et la course à grande vitesse, et ces phases imposent des exigences différentes au groupe musculaire IJ (en raison des différences de longueur/fréquence de foulée et de durée des phases de vol/freinage).**
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	**Déficit de force excentrique, déséquilibre de force entre les membres, fatigue musculaire, antécédents de blessures aux IJ, inhibition neuronale. Diminution de l'activation musculaire pendant la phase de swing tardive** après une blessure aux IJ.
Méthode(s) d'évaluation	Analyse des études existantes et de la littérature sur l'entraînement des IJ (exercices excentriques et isométriques) et leur transfert vers la performance et la prévention en sprint.
Objectif	**Discuter de l'efficacité de divers exercices (excentriques, isométriques et leurs transferts à la course) des IJ pour améliorer les performances et réduire le risque de blessure.**
Résultats	**Les exercices excentriques, en particulier le Nordic Hamstring montrent des adaptations bénéfiques et des taux de blessures plus faibles. Cependant, leur transfert vers l'amélioration de la cinématique du sprint est débattu.** **D'autres exercices, tels que le travail isométrique, sont prometteurs, mais manquent de preuves suffisantes provenant d'essais contrôlés randomisés.** **L'entraînement sur volant d'inertie, est prometteur mais aucune étude à ce jour n'a examiné les mécanismes biomécaniques à l'origine de ces résultats.** **L'entraînement au sprint ainsi que les exercices impliquant le contrôle pelvien ont aussi été discuter dans cette étude, démontrant un réel intérêt pour la rééducation.**

Tableau VI : Caractéristiques de l'étude de Vicens-Bordas et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	A Conceptual Exploration of Hamstring Muscle-Tendon Functioning during the Late-Swing Phase of Sprinting: The Importance of Evidence-Based Hamstring Training Frameworks
Auteurs et date	Kalkhoven et al. ; 2023
Schéma d'étude	Revue de la littérature
Population	Se concentre sur les athlètes pratiquant des sports nécessitant un sprint.
Critères d'exclusions	Non spécifié.
Définition de « hamstring injury »	**Blessure survenant principalement pendant la fin de la phase de swing.**
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Fonctionnement excentrique vs isométrique des IJ pendant le sprint, fatigue musculaire, fonctionnement musculotendineux des IJ pendant la phase terminale du swing.
Méthode(s) d'évaluation	Analyse et synthèse de la littérature existante en examinant les modèles de contraction **excentrique et isométrique**, et en discutant des implications pour les programmes d'entraînements.
Objectif	**Explorer de manière exhaustive la terminologie, les théories et les modèles existants relatifs à la fonction muscle-tendon pendant la phase terminale du swing lors du sprint.** **Relier ces modèles à la fonction potentielle des IJ lors du sprint en examinant diverses recherches spécifiques de ce même groupe musculaire.** **Souligner l'importance de développer et d'utiliser des cadres fondés sur des preuves pour guider l'entraînement des IJ chez les athlètes devant sprinter.**
Résultats	**Les IJ adoptent divers modes de fonctionnement (ressort, frein, moteur) selon leur architecture ainsi que leur activation musculaire.** **Bien que les tendons contribuent à la réduction des tensions et au stockage de l'énergie, le fonctionnement exact des muscles IJ pendant le sprint reste mal compris.** **→ Adoption d'exercices spécifiques pour ce groupe musculaire selon un cadre scientifique rigoureux afin de minimiser le risque de blessure.**

Tableau VII : Caractéristiques de l'étude de Kalkhoven et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Sprinting biomechanics and hamstring injuries: Is there a link? A literature review.
Auteurs et date	Kalema et al. ; 2021
Schéma d'étude	Revue de la littérature
Population	Diverses études impliquant des athlètes (football, sprinteurs) examinant les blessures aux IJ liées au sprint.
Critères d'exclusions	Non applicable (RDL)
Définition de « hamstring injury »	**Principalement dues à des étirements pendant la phase d'accélération ou de sprint à haute intensité.**
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Biomécanique de course, forces de réaction au sol, angles articulaires du tronc et du membre inférieur, moments de force, étirements du tendon-muscle des IJ, activité électromyographique de divers muscles du tronc et du membre inférieur.
Méthode(s) d'évaluation	Analyses rétrospectives et prospectives de données biomécaniques (force de réaction au sol, angles articulaires, activité électromyographique).
Objectif	**Examiner les preuves disponibles sur la relation potentielle entre la biomécanique de la course et les blessures aux IJ.**
Résultats	**Les preuves actuelles n'offrent pas de conclusions claires sur le lien entre la biomécanique du sprint et les lésions des IJ.** **Pour déchiffrer la cause ou l'effet, les études prospectives à grande échelle sont fondamentales pour établir si certaines variables biomécaniques du sprint sont associées au risque de lésion des IJ, bien que difficile à entreprendre.**

Tableau VIII : Caractéristiques de l'étude de Kalema et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Mechanisms of hamstring strain injury: Interactions between fatigue, muscle activation and function
Auteurs et date	Huygaerts et al. ; 2020
Schéma d'étude	RDL : Revue critique
Population	Différentes études portant sur les athlètes dans des sports à haute intensité.
Critères d'exclusions	Non applicable (RDL)
Définition de « hamstring injury »	**Caractérisée par une douleur aiguë à l'arrière de la cuisse avec une perturbation des fibres musculaires des IJ. Les blessures ne sont pas liées à un contact direct.**
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Fatigue musculaire, altérations de l'activité neuromusculaire, modifications de la coordination motrice, longueur des muscles-tendons, angles articulaires de la hanche et du genou pendant le sprint.
Méthode(s) d'évaluation	Analyse critique des études existantes sur les mécanismes de lésion des IJ, en se concentrant sur les interactions entre la fatigue, l'activation musculaire et la fonction des IJ.
Objectif	**Évaluer les données probantes actuelles et fournir un aperçu des mécanismes des lésions des IJ et des interactions entre la fatigue, l'activation et la fonction des muscles IJ et les interactions potentielles avec le risque lésionnel.**
Résultats	**La fatigue peut entraîner des altérations des schémas de coordination neuromusculaire, augmentant potentiellement le risque de lésion des IJ. Les preuves actuelles ne fournissent pas une perspective claire et non conflictuelle sur le lien potentiel entre la biomécanique du sprint et les lésions des IJ.**

Tableau IX : Caractéristiques de l'étude de Huygaerts et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Effects of flexibility and strength training on peak hamstring musculotendinous strains during sprinting
Auteurs et date	Wan et al. ; 2021
Schéma d'étude	Essai contrôlé randomisé avec deux groupes d'intervention (flexibilité et force).
Population	20 étudiants universitaires masculins (âgés de 18-24 ans) pratiquant régulièrement des activités sportives ont été répartis aléatoirement en 2 groupes : - Groupe flexibilité : exercices de flexibilité des IJ. - Groupe renforcement musculaire : exercices concentriques et excentriques des IJ.
Critères d'exclusions	Absence d'antécédents de blessures aux IJ ou aux membres inférieurs avant l'étude.
Définition de « hamstring injury »	Lésions musculotendineuses des IJ liées à un étirement excessif lors d'activités comme le sprint.
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Flexibilité et force musculaire des IJ, longueur musculotendineuse optimale et contraintes musculotendineuses maximales pendant le sprint.
Méthode(s) d'évaluation	Les participants ont suivi un programme d'exercices de 8 semaines, à raison de 3 sessions par semaine. Des tests d'évaluations avant, immédiatement après, et 30 minutes après l'intervention ont été effectué. Tests : flexibilité, force isocinétique, longueur musculo-tendineuse et biomécanique du sprint. Tests de sprint avec analyse cinématique 3D, tests de force isocinétique, mesures des longueurs musculotendineuses.
Objectif	**Déterminer les effets de la modification de la souplesse ou de la force des IJ sur les contraintes musculo-tendineuses maximales pendant le sprint.**
Résultats	**Les exercices de flexibilité des IJ augmentent significativement les longueurs musculo-tendineuses optimales des IJ et diminuent les tensions musculo-tendineuses maximales chez les athlètes masculins (effet net sur le semi-membraneux et BFlp). De plus, les tensions musculo-tendineuses maximales des 3 muscles IJ pendant le sprint ont diminué significativement. Cependant, la vitesse de sprint, la longueur des pas et la fréquence n'ont pas été modifiées de manière significative.** **Les exercices de forces ont montré que la longueur musculo-tendineuse optimale des 3 muscles a augmenté de manière significative, les contraintes musculo-tendineuses maximales des 3 muscles ont diminué pendant le sprint de la même manière. Cependant, la vitesse de sprint, la longueur des pas et la fréquence n'ont pas été modifiées.**

Tableau X : Caractéristiques de l'étude de Wan et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Titre	Does the FIFA 11+ program prevent hamstring injuries in college-aged male soccer players? A critically appraised topic
Auteurs et date	Street et al. ; 2020
Schéma d'étude	Sujet évalué de manière critique basé sur quatre études (essais contrôlés randomisés et une étude de cohorte).
Population	Joueurs de football masculins de niveau universitaire.
Critères d'exclusions	Études qui n'ont pas signalé le taux d'incidence des blessures aux IJ. Les participants qui n'étaient pas en âge d'aller à l'université (< 17 et > 25 ans).
Définition de « hamstring injury »	Blessures musculaires des IJ principalement enregistrées chez les joueurs de football, notamment lors du sprint.
Facteur(s) de risque étudié(s) / Paramètre(s) identifié(s)	Incidence des lésions aux IJ Efficacité du programme FIFA 11+ et de l'exercice Nordic Hamstring (NH) pour prévenir les blessures.
Méthode(s) d'évaluation	Analyse critique de quatre études sélectionnées, évaluées à l'aide de l'échelle PEDro pour la qualité méthodologique et la cohérence des résultats.
Objectif	**Examiner si le programme FIFA 11+ prévient les blessures aux IJ chez les joueurs de football universitaires masculins.**
Résultats	**Tous les articles inclus ont rapporté une réduction de l'incidence des blessures aux IJ chez les joueurs qui ont suivi le programme FIFA 11+ ou NH. Le programme FIFA 11+ a également montré une réduction du temps de récupération des blessures.**

Tableau XI : Caractéristiques de l'étude de Street et al.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Tableau XII : Caractéristiques générales des articles retenus

Auteurs et type d'étude	Critères PICO	Caractéristique de la population	Protocole et objectif de l'intervention	Résultats
Bramah et al. (2023) Revue narrative	**P :** athlètes pratiquant du sprint (football et athlétisme) **I :** Étude des paramètres biomécanique du sprint **C :** / **O :** Lien entre la biomécanique de la course et les lésions aux IJ	Athlètes pratiquant du sprint, principalement des footballeurs et des athlètes.	L'objectif de cette revue est d'identifier et de discuter de la pertinence du lien entre paramètres biomécaniques et lésions des IJ.	Facteurs influençant : le contrôle lombo-pelvien, l'inclinaison antérieur du bassin, le penchement du tronc vers l'avant, la flexion latérale du tronc et l'angle maximal de la flexion de hanche. Le rôle de la mécanique de course de sprint dans l'influence de la tension des tissus musculaires des IJ est appuyé par les études d'anatomie fonctionnelle et de modélisation biomécanique. **Recommandation pour d'avantage de recherches axées sur la biomécanique de course.**
Vicens-Bordas et al. (2024) Revue narrative	**P :** athlètes pratiquant du sprint ayant une lésion aux IJ **I :** Divers exercices de renforcements des IJ	Athlètes pratiquant du sprint, principalement des footballeurs et des athlètes souffrant d'une lésion aux IJ.	L'objectif de cette revue est d'identifier et comparer les différents types d'exercices tels que les exercices excentriques, isométriques et d'autres	Les exercices excentriques en particulier le Nordic Hamstring des IJ, montrent des adaptations bénéfiques et des taux de blessures plus faibles.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

	C : Exercice excentrique vs Exercice isométrique vs autres méthodes de renforcement **O :** Efficacité des exercices sur le renforcement et la prévention des lésions		interventions comme le volant d'inertie.	Les autres exercices sont prometteurs, mais manquent de preuves suffisantes provenant d'essais contrôlés randomisés. **La sélection des exercices pour optimiser la réhabilitation et préparer les athlètes au retour à la compétition est soulignée.**
Kalkhoven et al. (2023) Revue de la littérature	**P :** athlètes pratiquant du sprint (football et athlétisme) **I :** Analyse des modèles de fonctionnement des IJ **C :** Modèles excentrique vs isométrique **O :** Efficacité pour l'entraînement et la prévention des blessures	Athlètes pratiquant du sprint, principalement des footballeurs et des athlètes.	L'objectif de cette revue est d'identifier les modèles de fonctionnement des muscles IJ durant la phase de swing tardive.	Modèle traditionnel : allongement excentrique des IJ durant la phase de swing tardive Modèle récent (encore débattu) : IJ fonctionne de manière isométrique durant cette phase **→ Adoption d'exercices spécifiques pour ce groupe musculaire selon un cadre scientifique rigoureux afin de minimiser le risque de blessure.**
Kalema et al. (2021) Revue de la littérature	**P :** athlètes amateurs et professionnels **I :** Analyse des variables biomécaniques pendant le sprint	Athlètes pratiquant du sprint, principalement des footballeurs	L'objectif de cette revue est d'identifier les analyses rétrospectives et prospectives de données biomécaniques (force de réaction au sol, angles	Résultats mitigés et risque élevé de biais pour 11 études sur 16 **Les preuves actuelles n'offrent pas de conclusions claires sur le**

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

	C : / (Comparaison des données biomécaniques entre athlètes blessés et non blessés) **O :** Identification des liens entre biomécanique du sprint et blessures des ischio-jambiers		articulaires, activité électromyographique). **11 études rétrospectives** **2 études prospectives** **3 études comportant des volets rétrospectifs et prospectifs.**	**lien entre la biomécanique du sprint et les lésions des IJ.**
Huygaerts et al. (2020) Revue critique	**P :** Athlètes issus de sports nécessitant de la course à haute intensité **I :** Étude des mécanismes de la fatigue et de l'activation musculaire des IJ **C :** / (conditions avec ou sans fatigue) **O :** Effets de la fatigue sur les risques de blessures des IJ	Athlètes pratiquant du sprint, principalement des footballeurs.	L'objectif de cette revue est d'identifier les mécanismes de blessure des IJ, en se concentrant sur les interactions entre la fatigue et l'activation musculaire.	La fatigue joue un rôle crucial dans l'augmentation du risque de blessure des IJ. Les lésions des IJ sont plus susceptibles de se produire pendant la phase terminale du swing ou la phase initiale pendant la course. **Les modèles actuels de simulation des blessures des IJ sont limités et nécessitent des améliorations pour inclure la variabilité anatomique et les effets de la fatigue.**
Wan et al. (2021) Essai contrôlé randomisé	**P :** Athlètes masculins de niveau universitaire **I :** Entraînement de la flexibilité et de la force	20 étudiants masculins, âgés de 18 à 24 ans, pratiquant régulièrement des activités sportives.	Les participants ont été assignés à un groupe de flexibilité (souplesse) ou de force, avec des séances d'entraînement	**Le groupe de flexibilité** a **augmenté significativement les longueurs musculotendineuses** optimales des muscles semimembraneuxs et BFlp, et

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

	C : Groupe de flexibilité vs. groupe de force **O :** Longueur musculotendineuse optimale et tensions musculotendineuses pendant le sprint	Pas d'antécédent de lésion aux IJ.	trois fois par semaine pendant 8 semaines. Tests de flexibilité, de sprint et de force (exercices concentriques et excentriques) réalisés avant et après les interventions.	**diminué les tensions musculotendineuses maximales.** **Le groupe de force** a également montré des **augmentations significatives des longueurs musculotendineuses** optimales de tous les muscles IJ et **des diminutions des tensions musculotendineuses maximales pendant le sprint.**
Street et al. (2020) Revue critique	**P :** Joueurs de football masculin **I :** Programme FIFA 11+ et le Nordic Hamstring (NH) **C : /** (Programme FIFA 11+ et/ou Exercice Nordic Hamstring) **O :** Réduction des blessures aux IJ	Joueurs de football universitaire masculins âgés de 17 à 25 ans.	Études incluses : 3 essais contrôlés randomisés, 1 étude de cohorte. Utilisation du programme FIFA 11+ et/ou exercice Nordic Hamstring comme intervention, comparé à des groupes de contrôle ne réalisant pas ces interventions.	Les études montrent que **le programme FIFA 11+ réduit le taux de blessures aux IJ.** Le programme FIFA 11+ a également montré **une réduction du temps de récupération des blessures.**

P : Population ; I : Intervention ; C : Comparateur ; O : Outcome

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.3.2. Évaluation de la qualité des articles et biais méthodologiques

Critères	Réponse	Justifications
1. Les critères d'éligibilité ont été précisés *(non comptabilisé)*	Oui	20 étudiants masculins, âgés de 18 à 24 ans antécédents de blessures aux IJ.
2. Les sujets ont été répartis aléatoirement dans les groupes	Oui	Sujets attribués de manière aléatoire dans le groupe de force ou de flexibilité.
3. La répartition a respecté une assignation secrète	Non	Non mentionné.
4. Les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants	Oui	Caractéristiques similaires en termes d'âge, de masse corporelle et de hauteur.
5. Tous les sujets étaient "en aveugle"	Non	Impossible dans ce type d'étude.
6. Tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"	Non	Peu probable, car l'intervention est active et nécessite l'implication des entraîneurs.
7. Tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels	Non	Non mentionné.
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	Oui	Tous les sujets ont été jusqu'au bout de l'étude. Cependant, certains ont des données incomplètes en raison d'erreurs d'équipement.
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	L'étude ne mentionne pas explicitement une analyse en intention de traiter.
10. Les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels	Oui	Pour la longueur et la tension musculotendineuses optimales
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	Oui	Des mesures de précisions et de variabilité sont rapportés pour plusieurs résultats.

Tableau XIII : Qualité méthodologique de l'étude de Wan et al. en lien avec l'échelle PEDro

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Avec un score de 6/10, l'essai contrôlé randomisé de Xianglin Wan et al. a une bonne qualité méthodologique. Cependant, il reste des aspects dans lesquels la qualité méthodologique pourrait progresser, Elle reste une source pertinente mais avec un risque modéré de biais.

Tableau XIV – Évaluation méthodologique des revues narratives selon l'échelle SANRA

	1	2	3	4	5	6	Note/12	Qualité
Bramah et al. (2023)	2	1	1	1	1	2	8	Bonne
Vicens-Bordas et al. (2024)	2	1	2	1	1	2	9	Bonne
Kalkhoven et al. (2023)	2	1	2	1	1	2	9	Bonne
Kalema et al. (2021)	2	1	1	2	2	1	9	Bonne
Huygaerts et al. (2020)	2	1	2	1	1	2	9	Bonne
Street et al. (2020)	2	1	1	2	2	2	9	Bonne

1/ Justification de la pertinence de l'article, 2/ Énoncé des objectifs ou formulation des questions, 3/ Description de la littérature, 4/ Référencement 5/ Raisonnement scientifique 6/ Présentation approprié des données ; Pour chaque critère, la revue est évaluée sur une échelle de 0 à 2 : 0 : Critère non satisfait 1 : Critère partiellement satisfait 2 : Critère totalement satisfait

L'analyse des biais est essentielle pour évaluer la qualité des études incluses. Il existe un risque de **biais méthodologique** (par exemple, Bramah et al., Vicens-Bordas et al., Kalkhoven et al. ont utilisé des approches narratives sans application rigoureuse de méthodologies systématiques, ce qui peut introduire un **biais de sélection**). Nous pouvons retrouver **un biais de publication** car les revues pourraient favoriser des études dont les

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

résultats sont plus affirmatifs et significatifs. Nous pouvons également retrouver **un biais d'interprétation** par le fait que les études incluent différentes méthodologies et échantillons, ce qui peut rendre les comparaisons moins fiables. Il peut aussi y avoir un risque de **biais lié aux données** (sources non exhaustives comme les revues de Street et al. (2020) et Kalema et al. (2021)).

Nous pouvons souligner un **manque de données empiriques**. En effet, les revues narratives, telles que l'étude de Bramah et al. (2023), reposent généralement sur des modèles théoriques, ce qui peut limiter leur applicabilité pratique. Cette même étude peut se retrouver face à **un biais de confirmation** puisque l'analyse se concentre principalement sur les études qui soutiennent l'idée que la biomécanique des sprints joue un rôle central dans les blessures des IJ, ce qui pourrait limiter la variété des perspectives prises en compte. Notons également un potentiel **biais spécifique aux populations étudiées** (la plupart des études incluses dans ce mémoire se concentrent sur des athlètes masculins, en excluant les femmes et les jeunes). Nous pouvons avoir aussi un **biais statistique** lié à l'absence d'analyse longitudinale (pas de suivi des participants sur le long terme).

En ce qui concerne ce mémoire, il existe potentiellement **un biais de sélection** des études (uniquement fait par l'étudiant), **un biais d'interprétation**, **un biais d'information** et u**n biais lié aux populations** et **aux données** (limité aux athlètes masculins).

En somme, les biais identifiés soulignent la nécessité d'améliorer la méthodologie des futures recherches sur la biomécanique du sprint et les lésions des IJ. Une harmonisation des protocoles, des échantillons plus larges et diversifiés, ainsi que des études prospectives longitudinales rigoureuses permettront de réduire ces biais et d'obtenir des résultats plus fiables.

4.4. Analyse statistique descriptive

4.4.1. Type d'études

Ce mémoire inclut six revues de la littérature (narratives/critiques) réalisées par Bramah et al. (2023), Kalema et al. (2021), Vicens-Bordas et al. (2024), Street et al. (2020), Kalkhoven et al. (2023), Huygaerts et al. (2020). Il inclut également une étude expérimentale randomisée contrôlée menée par Wan et al. (2021).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.4.2. Taille des échantillons

L'étude expérimentale, menée par Wan et al. (2021), a impliqué 20 étudiants universitaires masculins (18-24 ans), assignés à des groupes de flexibilité et de force.

Les revues narratives incluent les travaux suivants :

- **Street et al. (2020)** : 4 études incluses (23 000 joueurs de football universitaire masculin)
- **Kalema et al. (2021) :** 18 études au total, 16 études incluses dont 11 études rétrospectives, deux études prospectives et trois études comportant à la fois des volets rétrospectifs et prospectifs. Deux autres études de cas ont recueilli des données avant et après une lésion aux IJ.
- **Bramah et al. (2023), Vicens-Bordas et al. (2024), Kalkhoven et al. (2023), Huygaerts et al. (2020) :** Non mentionnée (analyse qualitative basée sur des études biomécaniques préexistantes, évaluant les interventions IJ…).

4.4.3. Orientation méthodologique et critères de jugement principaux

Nos critères de jugements principaux sont les suivants ;

- **Réduction de l'incidence des blessures** : quantifiée dans 4 études (Wan, Street, Vicens-Bordas, Kalkhoven) et rapportée qualitativement dans 3 études (Bramah, Kalema, Huygaerts)
- **Modification de la biomécanique** : mesurée directement (tension musculo-tendineuse par exemple) dans 3 études (Wan, Vicens-Bordas, Kalkhoven) et hypothèses sur la base de modèles théoriques dans 3 études (Bramah, Kalema, Huygaerts)

Bramah et al. (2023) : Étude qualitative fondée sur des recherches en anatomie fonctionnelle, en modélisation biomécanique, ainsi que des observations cinématiques et cinétiques du sprint. L'étude met l'accent sur les facteurs biomécaniques influençant la tension des IJ et les implications pour les stratégies de prévention. Comme critères de jugement principaux nous retrouvons une identification des **phases de course critiques** pour les IJ ainsi qu'une analyse des **paramètres cinématiques et cinétiques** influençant leurs mises en tensions.

Vicens-Bordas et al. (2024) : Synthèse des données existantes sur les effets des exercices excentriques, isométriques et concentriques sur les IJ, en mettant en avant les lacunes méthodologiques et les perspectives pour améliorer la cinématique du sprint et prévenir les blessures. Les critères de jugement principaux incluent les effets des exercices excentriques et isométriques, les changements dans la **cinématique de la phase de balancement** après les interventions, une réduction des **taux de blessures** et une amélioration des **performances des IJ**.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Kalkhoven et al. (2023) : Étude conceptuelle des modèles associés à la fonction musculo-tendineuse des IJ pendant le sprint. Parmi les principaux critères d'évaluation, on retrouve une exploration des modèles de contraction musculo-tendineuse **(isométrique, excentrique)**, une compréhension de la fonction des muscles et des tendons pendant le sprint ainsi que les effets de l'adaptation des tissus sur la transmission de force et les interactions musculaires.

Kalema et al. (2021) : Recherche structurée dans la littérature biomécanique sur le lien potentiel entre les variables du sprint et les lésions des IJ. Méthode établie avec une évaluation critique des études incluses à l'aide de grilles méthodologiques (QUIPS) pour identifier les biais et la validité des conclusions. Les principaux éléments d'analyse sont la relation entre la **biomécanique du sprint** et les lésions des IJ ainsi que la comparaison des **variables biomécaniques** entre athlètes blessés et non blessés.

Huygaerts et al. (2020) : Étude des mécanismes de blessure des IJ lors des phases cruciales du sprint, en considérant l'influence de la fatigue sur les caractéristiques neuromusculaires et le mouvement. Étude basée sur des modèles biomécaniques et des observations expérimentales. Les critères fondamentaux pour cette évaluation sont l'influence de la **fatigue** sur les **schémas de coordination neuromusculaire**, l'altérations des **propriétés biomécaniques** (raideur, tension musculaire) sous la fatigue et l'identification des phases critiques du sprint pour les lésions (balancement tardif, appui précoce).

Wan et al. (2021) : Étude interventionnelle comparant deux groupes (flexibilité et renforcement musculaire) sur les paramètres biomécaniques des IJ après 8 semaines d'entraînement. Les indicateurs de référence principaux sont le changement des **longueurs musculo-tendineuses optimales** des IJ après intervention ainsi que la réduction des **tensions musculo-tendineuses maximales** pendant le sprint.

Street et al. (2020) : Synthèse des études de niveau 2 ou supérieur évaluant l'efficacité du programme d'échauffement FIFA 11+ et du Nordic Hamstring (NH) sur les taux de blessures des IJ. Mise en avant des résultats quantitatifs et des méthodologies appliquées dans les études incluses. Parmi les paramètres clés d'observation, figurent **l'efficacité du programme FIFA 11+** et du **Nordic Hamstring** sur la réduction des taux de blessures.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.5. Résultats des études

Cette revue de littérature s'appuie sur les connaissances actuelles concernant la fonction biomécanique des muscles IJ et les protocoles de prévention associés.

L'analyse des études disponibles met en lumière une absence de méthodes standardisées permettant d'évaluer de manière précise le lien entre la biomécanique de la course à haute vitesse et les lésions des IJ. La relation entre la biomécanique du sprint et les blessures des IJ s'avère particulièrement complexe. **Bramah et al. (2023)** et **Kalema et al. (2021)** soulignent que les études actuelles peinent à identifier des paramètres biomécaniques spécifiques comme facteurs de risque isolés. En réponse à cette difficulté, les auteurs préconisent une approche multifactorielle prenant en compte une combinaison de paramètres cinématiques et cinétiques susceptibles d'interagir pour influencer les tensions exercées sur les muscles IJ.

4.5.1. Rôle de la mécanique de course de sprint dans l'influence de la tension des muscles ischio-jambiers

L'étude de **Bramah et al. (2023)** identifie plusieurs paramètres cinématiques cruciaux pour la prévention des blessures aux IJ tels que **le contrôle lombo-pelvien, l'inclinaison antérieure du bassin, l'angle maximal de la flexion de hanche, la flexion du tronc** ainsi que **la flexion latérale de ce dernier**. Ces facteurs semblent jouer un rôle clé dans la prévention en influençant directement la mécanique des tissus musculaires lors du sprint.

Huygaerts et al. (2020) présentent des résultats indiquant que les IJ, notamment le BFlp, subissent des forces considérables tout en stabilisant le genou pendant le sprint. De plus, la **fatigue** semble également jouer son rôle dans la biomécanique des tissus puisque cette revue montre que celle-ci **diminue la raideur des membres inférieurs**, provoquant des altérations dans le modèle de course.

Bramah et al. (2023) mettent en évidence que certaines phases spécifiques de la course, notamment **la phase de balancement tardif**, exposent les IJ à un risque accru de lésions en raison des charges importantes qu'ils doivent supporter pour contrôler la décélération de la jambe avant le contact au sol. **Huygaerts et al. (2020)** identifient également **la phase d'oscillation tardive** et **la phase d'appui précoce** comme moments critiques pour le risque de blessure, où les contraintes excentriques maximales sont appliquées sur les IJ, dépassant souvent leurs capacités physiologiques. Les auteurs soulignent que certaines études, qu'elles soient récentes ou anciennes, ont montré que la phase d'appui précoce est la cause d'un

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

second pic d'activité musculaire des IJ, en raison des moments de flexion maximale du genou et d'extension de la hanche au moment du contact avec le sol.

Kalkhoven et al. (2023) rapportent que les IJ fonctionnent principalement comme un frein excentrique lors de la phase de balancement tardif du sprint, tout en absorbant des charges mécaniques importantes. L'architecture musculaire spécifique influe sur leur rôle, avec certains muscles, tels que **le semitendineux, adaptés aux grandes excursions fasciculaires** (bien adapté pour des mouvements d'étirement et de contraction sur de longues distances), tandis que d'autres, comme **le BF, optimisé pour la production rapide de force, facilitent une locomotion à ressort.**

Dans une autre perspective, **Kalema et al. (2021)** décrivent **les phases d'accélération et les phases de vitesse maximale,** montrant qu'elles engendrent de fortes sollicitations aux IJ. Les auteurs soulignent que des **déséquilibres de coordination musculaire** ou une **technique de course inefficace** augmentent significativement les contraintes sur les IJ. Par exemple, une utilisation excessive des quadriceps sans stimulation optimale des IJ accroît les risques de blessure, insistant sur l'importance d'évaluer et de corriger la mécanique de course. **Kalema et al. (2021)** rapportent également que onze études se sont penchées sur les différentes techniques de course en sprint entre les individus ayant ou non des blessures aux IJ. Ces recherches ont analysé diverses variables, telles que les forces de réaction au sol, les angles des articulations et l'activité EMG des muscles IJ. Six études ont trouvé des différences significatives, tandis que cinq n'ont observé aucune différence.

Par ailleurs, **Wan et al. (2021)** démontrent que des interventions ciblées sur **la flexibilité** et **la force** des IJ **augmentent leur longueur musculo-tendineuse optimale**, réduisant ainsi les contraintes maximales pendant le sprint. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer des exercices spécifiques pour diminuer les tensions pendant la course à haute vitesse.

Enfin**, Bramah et al. (2023)** attirent l'attention sur l'impact de la biomécanique individuelle des athlètes. Ils relèvent que **les athlètes avec une grande amplitude de mouvement** peuvent paradoxalement être **plus vulnérables** en raison de la position allongée excessive des IJ, augmentant ainsi leur risque de blessure. Ces auteurs mentionnent également des facteurs tels que **la sur-foulée, l'extension lombaire** ou encore **la mécanique de la face arrière (back-side mechanics)**, bien que ces éléments manquent encore de validation expérimentale. En s'appuyant principalement sur des études d'anatomie fonctionnelle et de modélisation biomécanique, ils concluent que la mécanique de course joue un rôle déterminant dans les tensions exercées sur les tissus musculaires.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

4.5.2. Influence de la fatigue et de la coordination neuromusculaire sur la biomécanique de course ?

Dans la partie précédente, il a été mentionné que **Huygaerts et al. (2020)** ont identifié les phases de balancement tardif et de mise en appui précoce comme des moments critiques pour les IJ. Ces contraintes sont amplifiées par les modifications neuromusculaires induites par la fatigue, notamment au niveau du BFlp. En effet, les auteurs soulignent que la fatigue entraîne des altérations significatives des schémas d'activation des IJ. Huygaerts et al. (2020) soulignent **une augmentation de l'activation précoce du BF et du semitendineux accompagnée d'une diminution anticipée de l'activation du droit fémoral.** Ils suggèrent que cela entraine une répartition déséquilibrée des charges au sein des groupes musculaires. Ces modifications neuromusculaires perturbent la synchronisation entre les muscles fléchisseurs et extenseurs du genou, augmentant la tension supportée par les IJ durant les phases de décélérations de la jambe.

De plus, la fatigue atteint la biomécanique de course favorisant l'apparition de ce que les auteurs appellent un modèle de course **"Groucho"**. Ce modèle représente un schéma de locomotion pendant lequel le genou reste fléchi toute la foulée Cela réduit les forces de réaction verticales au sol (dont les forces d'impact) mais augmente le coût énergétique de la locomotion en minimisant le rebond élastique physiologique, ce qui entraîne un déséquilibre dans l'activation musculaire et une sur-sollicitation des IJ. Par ailleurs, **la diminution de la raideur musculaire des membres inférieurs** induite par la fatigue limite la capacité des IJ à résister aux contraintes, augmentant donc leur vulnérabilité. Cette situation, prédominée par la fatigue, peut également favoriser **une inclinaison antérieure accrue du bassin** lors de la phase de balancement tardif, plaçant le biceps fémoral à une longueur plus vulnérable aux contraintes. Ainsi, les auteurs soulignent que **la fatigue réduit** non seulement **l'efficacité de la course,** mais expose également les IJ à des contraintes additionnelles **en perturbant la répartition des forces** et en **réduisant la capacité de stabilisation du membre inférieur**.

4.5.3. Interventions et prévention des blessures aux ischio-jambiers

Les interventions visant à prévenir les lésions myo-aponévrotiques des IJ dans les sports nécessitant des courses de sprint, telles que le football et l'athlétisme, reposent en priorité sur l'amélioration de la force musculaire, de la flexibilité et sur l'intégration d'exercices spécifiques au sein des programmes d'entraînement. Ces stratégies ont pour cible les facteurs biomécaniques contribuant aux blessures. Selon **Bramah et al. (2023)** pour réduire ce risque,

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

les programmes de prévention doivent viser à **réduire les contraintes mécaniques appliquées et renforcer la capacité des tissus à supporter ces contraintes.**

D'une part, les exercices excentriques, notamment le **Nordic Hamstring (NH)** apparaissent comme une méthode particulièrement efficace pour améliorer la résistance aux contraintes mécaniques des IJ. **Vicens-Bordas et al. (2024)** montrent que ce type d'exercice renforce la capacité des IJ à produire un couple lors de leur allongement actif pendant des phases critiques de la course notamment le balancement tardif. Les auteurs soulignent également que **le renforcement excentrique est à prioriser** tandis que les autres approches de réadaptation (les exercices isométriques, volant d'inertie) ne peuvent pas être prescrites avec le même niveau de confiance.

Kalkhoven et al. (2023) comparent les effets des exercices excentriques et isométriques sur la **prévention des blessures aux IJ.** Bien que la prévention des blessures de ces muscles soit souvent associées aux exercices excentriques grâce à leur impact sur la capacité d'allongement **musculo-tendineuse** des IJ, les auteurs démontrent que **les exercices isométriques** jouent un rôle complémentaire en améliorant la stabilité et la capacité des muscles à résister à des charges statiques prolongées. L'association des deux types d'exercices est présentée comme une approche pouvant contribuer à une meilleure protection.

Wan et al. (2021) mettent en avant l'importance **des exercices de flexibilité et de renforcement** (concentrique et excentrique) des IJ sur la prévention des blessures. Ils démontrent que huit semaines d'entraînement en flexibilité et en force augmentent significativement les **longueurs musculo-tendineuses optimales**, réduisant ainsi la tension maximale supportée par les IJ pendant le sprint. Cette augmentation de la longueur et de la flexibilité permet une meilleure tolérance des IJ aux étirements rapides lors des phases de balancement, ce qui pourrait réduire leur vulnérabilité aux blessures.

Street et al. (2020) examinent les effets du **programme d'échauffement FIFA 11+**, conçu pour prévenir les blessures aux membres inférieurs, notamment les IJ. Ce programme inclut des exercices spécifiques, comme **le NH**, visant à améliorer la force excentrique des IJ. Les résultats de Street et al. (2020) montrent que l'intégration du programme FIFA 11+ dans les routines d'échauffement **réduit considérablement l'incidence des blessures aux IJ** chez les footballeurs universitaires. L'évaluation de l'efficacité du FIFA 11+ révèle que ce programme améliore à la fois la **force musculaire** et la **stabilité neuromusculaire,** contribuant ainsi à une biomécanique de course plus efficiente.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

5. Discussion

5.1. Rappel des objectifs de l'étude

Pour rappel, cette revue de littérature avait pour objectif d'étudier l'impact de la biomécanique de course en sprint sur le mécanisme lésionnel des IJ dans des sports tels que le football et l'athlétisme. Malgré la difficulté des études à établir un lien clair entre la biomécanique du sprint et les lésions des IJ, la question demeure de savoir si seule l'exposition au sprint suffit à prévenir les blessures ou si la biomécanique spécifique de la course à haute vitesse joue également un rôle primordial. Des éléments suggèrent qu'un lien pourrait exister entre certaines variables biomécaniques du sprint et la survenue de lésions des IJ. Il y a déjà plus de quarante ans, Mann et Sprague (44,45) avaient mis en lumière cette hypothèse en associant l'amplitude du moment articulaire de la hanche lors de l'attaque du pied au sprint à l'incidence de ce type de lésion.

5.2. Synthèse et interprétation des résultats principaux

5.2.1. Paramètres biomécaniques

Déjà, notons une absence de consensus sur les paramètres biomécaniques isolés. Les données de **Kalema et al. (2021)** confirment que certains paramètres cinématiques, **bien que significatifs dans certaines études, manquent de cohérence entre les recherches.** Les données actuelles ne permettent pas encore d'établir une concordance claire sur le lien entre la biomécanique du sprint et les lésions musculaires aux IJ. Cette hétérogénéité méthodologique pourrait en partie expliquer les progrès limités dans ce domaine, ainsi que le taux élevé de récidives observé chez les athlètes.

Toutefois, comme le souligne **Bramah et al. (2023)**, une approche multifactorielle est essentielle pour une prévention individualisée des LMA. C'est pourquoi, nous allons exposer ci-dessous les éléments biomécaniques qu'il semble crucial de prendre en compte dans cette perspective préventive ;

⇒ <u>Paramètres biomécaniques identifiés</u>

Dans un premier temps, **Huygaerts et al. (2020)** démontrent que **la fatigue musculaire** représente un facteur clé dans l'altération des mécanismes biomécaniques de course **(diminution de la raideur des membres inférieurs, efficacité réduite et moments articulaires plus élevés)**, augmentant ainsi significativement le risque de lésions des IJ

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

notamment pendant les courses à hautes intensités telles que le sprint. Cependant, **Wan et al. (2021)** ont démontré des résultats totalement opposés en montrant que les exercices de **flexibilité** et/ou de **renforcement** des IJ augmentaient significativement leur tolérance aux contraintes mécaniques et diminuent les tensions musculo-tendineuses maximales. Malgré ces résultats convainquants **Wan et al. (2021)** ne prennent pas en compte l'impact de la fatigue sur ces adaptations. Or, **Huygaerts et al. (2020)** mettent l'accent sur un point : en état de fatigue, les altérations neuromusculaires peuvent **surpasser les capacités d'adaptation musculaire** et provoquer des blessures malgré un bon entraînement. Ainsi, il reste incertain si les bénéfices observés dans l'étude de **Wan et al. (2021)** persistent en situation de fatigue, un facteur que **Huygaerts et al. (2020)** considèrent comme un élément central du risque de blessure.

De plus, ce phénomène, combiné aux résultats de **Bramah et al. (2023)** et de **Kalema et al. (2021)**, met en évidence l'importance du **contrôle lombo-pelvien** dans la prévention des lésions aux IJ. Si celui-ci est altéré, il peut provoquer un transfert de force inefficace à travers le tronc et le bassin. Chumanov et al. (2011) nomment ce concept **« couplage dynamique »**, signifiant l'influence des muscles du tronc et du bassin sur l'étirement du BF pendant la course. Il est intéressant de noter que **l'ilio-psoas de la jambe controlatérale** a été observé comme augmentant l'étirement du BF de plus de 25 mm en accélérant le bassin en rotation antérieure, allongeant ainsi l'insertion proximale des IJ. En revanche, des muscles tels que **le grand fessier, les obliques internes** et **externes** ainsi que **le grand adducteur** réduisent cet étirement en résistant aux forces de rotation antérieure générées par l'ilio-psoas. De plus, Higashihara et al. (2022) ont notamment observé, lors d'une tâche de perturbation imprévue, **un début retardé de l'activité musculaire du grand fessier** et **des érecteurs du rachis** chez les individus ayant des antécédents de lésion aux IJ. Cela concorde avec les résultats de Schuermans et al. (2017) qui ont mis en évidence que les joueurs non blessés présentaient une activité EMG significativement plus élevée du **grand fessier pendant le swing tardif** et **des muscles du tronc pendant le swing précoce**, ce qui a été associé à une réduction du risque de lésion des IJ. Par conséquent, d'un point de vue clinique, la prise en compte des facteurs influençant le contrôle lombo-pelvien apparaît logique et justifiée dans les programmes de réadaptation et de prévention des blessures. Ainsi, une coordination neuromusculaire altérée entre les membres ainsi que des fluctuations du contrôle lombo-pelvien peuvent induire des schémas de tension variables des IJ.

Des études anatomiques **(Bramah et al. 2023)** suggèrent également qu'une **rotation** ou une **flexion latérale excessive du tronc** peut perturber les relations longueur-tension de la musculature du tronc, réduisant la capacité à stabiliser le bassin et l'articulation sacro-iliaque.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Cette instabilité compromet le transfert de force entre les membres, augmentant la tension sur les IJ (Chumanov et al., 2007 ; Nakamura et al., 2020). Des études soutiennent cette hypothèse en montrant que l'activité musculaire du tronc influence la raideur de l'articulation sacro-iliaque. Par ailleurs, **l'inclinaison antérieure du bassin** a été identifiée comme augmentant significativement la tension passive des IJ, atteignant 31,5 % pour le BF (Nakamura et al., 2016). Ces travaux montrent qu'une réduction de l'inclinaison antérieure du bassin pendant les activités dynamiques, y compris la course, peut diminuer cette tension et donc potentiellement le risque de lésion aux IJ. D'autres études prospectives (Kalema et al. 2021 ; Vicens-Bordas et al. 2024) semblent être conformes aux résultats précédents. En effet, ces travaux ont exploré les variables cinématiques et cinétiques du sprint, révélant des facteurs tels qu'une **inclinaison antérieure accumulée du bassin** (*Anterior Pelvic Tilt)* et **une flexion latérale thoracique** associée aux blessures ultérieures. Notons qu'une flexion latérale excessive du tronc pourrait résulter d'une coordination altérée des muscles du tronc, notamment **des obliques**. Les insertions directes de ces derniers sur la colonne vertébrale et le bassin, combinées à l'orientation de leurs fibres, permettent à ces muscles de résister à la flexion latérale et à la rotation du tronc, tout en exerçant des forces de compression sur le bassin et l'articulation sacro-iliaque, contribuant ainsi à la fermeture forcée et à la réduction de l'inclinaison antérieure du bassin. Cependant, des limitations méthodologiques importantes, notamment des biais, l'absence de normalisation adéquate des données EMG et un suivi insuffisant de l'exposition au sprint, ont été relevés. Ces faiblesses méthodologiques limitent la généralisation des résultats.

Concernant **le tronc, une flexion excessive** de ce dernier pendant le sprint accentue la tension exercée sur les IJ en allongeant les tissus musculaires et en amplifiant les contraintes mécaniques sur la hanche. **Bramah et al. (2023)** expliquent ceci par les travaux de Higashihara et al. qui ont montré que cette posture étire les IJ, tandis que Schache et al. ont observé une hausse de la charge mécanique et du taux de tension associée à une flexion accrue du tronc. Kerin et al. ont également rapporté que toutes les blessures survenues lors d'un sprint chez des joueurs de rugby étaient liées à cette posture. Bien que ces observations soient cohérentes, des études supplémentaires sont nécessaires pour clarifier ce lien.

Aussi, Yu et al. (2017) ont émis l'hypothèse qu'une **extension rapide du genou lors de la poussée (triple extension)** en fin d'appui pourrait augmenter les tensions sur les IJ.
En effet, ce type de technique est souvent observé lors de la phase d'impulsion, mais peut être inefficace pour la production de force si elle est retrouvée pendant la phase de course à vitesse maximale. Cette hypothèse repose sur l'idée que les forces maximales de réaction au sol sont générées dans la première moitié de la phase d'appui où l'athlète continue de pousser

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

contre le sol après le moment où cette force maximale est atteinte. Cela pourrait entraîner plusieurs conséquences biomécaniques : un temps d'appui plus long, un temps de vol plus court, et donc moins de temps pour repositionner le membre inférieur en vue du contact suivant, augmentant ainsi la nécessité d'un changement de jambe plus rapide. Ce phénomène a été associé à une foulée surallongée (over-stride) et/ou à une inclinaison antérieure du tronc mais aucune étude expérimentale n'a encore exploré le lien entre la triple extension et une éventuelle lésion pour le moment.



Figure 7 : Principe de la triple extension

Des observations similaires ont été rapportées au sein d'études rétrospectives (Bramah et al. 2023 ; Vicens-Bordas et al. 2024) pour **l'angle maximal de flexion de la hanche**, un paramètre qui pourrait représenter **un compromis entre performance et blessure.** En effet, un angle maximal de flexion de hanche plus grand augmente la hauteur du segment fémoral permettant une plus grande amplitude de mouvement du membre inférieur durant la phase de balancier et favorisant ainsi de fortes accélérations angulaires avant le contact au sol. Cela contribue à générer une force de réaction au sol élevée en début d'appui, déterminante pour la performance en sprint. Higashihara et al. (2019) et Lee et al. (2009) ont trouvé des résultats divergents par rapport aux résultats de Daly et al. (2016). De plus, Higashihara et al. ont observé une baisse de l'activité du BF, une réduction de sa longueur et une flexion du genou accrue en fin de phase de balancier, tandis que Lee et al. ont rapporté une diminution du couple excentrique maximal des IJ et de l'angle associé. Cependant, l'analyse des auteurs a convergé vers l'idée qu'une réduction de cet angle pourrait constituer une stratégie post-blessure visant à protéger les IJ. De plus, **Vicens-Bordas et al. (2024)** notent qu'**une**

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

diminution de la production de force horizontale pendant le sprint est associée à un risque accru de blessure des IJ. Ces derniers jouent un rôle majeur dans la production de cette force, et une activité EMG réduite du BF ainsi qu'un couple fléchisseur excentrique diminué contribuent à cette baisse.

Enfin, **la foulée excessive (l'over-striding)**, la **« mécanique de la face arrière » (back-side mechanics)** et **l'extension lombaire excessive** sont trois facteurs biomécaniques théoriquement associés aux LMA des IJ. La **sur-foulée,** caractérisée par un contact du pied devant le centre de gravité, peut augmenter la tension des IJ par des forces de freinage accrues et une exposition à des moments de flexion de hanche élevés, bien que les données actuelles soient limitées. La **mécanique de la face arrière**, caractérisée par une extension excessive de la jambe arrière (conduisant à la triple extension), pourrait influencer la tension des IJ via une augmentation de l'inclinaison antérieure du bassin, mais les études prospectives n'ont pas établi de lien direct avec les LMA. Enfin, **l'extension lombaire excessive** pourrait altérer la fonction nerveuse et contribuer indirectement à ces blessures, bien qu'aucune étude biomécanique n'ait confirmé ce lien, qui semble plutôt découler d'un couplage cinématique.

Ainsi la fatigue musculaire, soulignée par **Huygaerts et al. (2020),** pourrait accentuer les « défauts » biomécaniques du sprint identifiés par **Bramah et al. (2023), Kalema et al. (2021)** ainsi que **Vicens-Bordas et al. (2024).** En d'autres termes, si la fatigue perturbe la coordination et les propriétés musculaires, cela pourrait rendre les potentielles anomalies biomécaniques encore plus problématiques. Par conséquent, une technique de course non optimale associée à un état de fatigue pourrait exacerber la tension sur les IJ et augmenter le risque de blessure.

⇒ <u>Biomécaniques des tissus musculaires</u>

Vicens-Bordas et al. (2024) remettent en question la transférabilité des exercices excentriques vers la course, en raison des différences de vitesse de contraction et de coordination intermusculaire**.** Ils suggèrent des contractions **quasi-isométriques** des IJ pendant la phase de swing. Au sein de leur revue, ils décrivent les travaux de **Van Hooren et Bosch** (10) où il est suggéré que les IJ s'allongent passivement pendant les phases initiales et intermédiaires du swing lors d'un sprint, avant de se contracter de manière isométrique à la fin du balancement. Ils avancent également que les mouvements observés dans cette phase sont modulés par l'élément élastique en série, interprété comme les tendons et autres tissus conjonctifs tels que **les fascias** entourant le muscle, qui se "**déforment et se rétractent de**

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

manière semblable à un ressort". Cependant, les profils cinématiques et cinétiques des articulations du genou et de la hanche pendant la phase de balancier montrent que les IJ doivent gérer des forces importantes, en particulier lors de la décélération rapide du genou en fin de balancement, suggérant donc **un rôle excentrique actif**.

Les résultats de Vicens-Bordas et al. (2024) apportent un complément important aux conclusions de Street et al. (2020) en élargissant la discussion sur les types d'exercices efficaces afin de prévenir les blessures. Si Street et al. (2020) confirment que le NH est efficace, Vicens-Bordas et al. (2024) suggèrent que combiner différents types d'exercices (excentriques, isométriques, concentriques) pourrait être un atout dans le domaine de prévention des blessures. Ainsi, plutôt que de s'appuyer uniquement sur le NH, une approche plus diversifiée de l'entraînement pourrait améliorer la tolérance des IJ aux contraintes mécaniques. Nous aborderons plus en détail le domaine de la prévention dans les parties suivantes.

Kalkhoven et al. (2023) soulignent les limites conceptuelles des termes concentrique, excentrique et notamment la définition du terme isométrique qui est remise en question. En effet, la déformation des fibres ne permet pas de parler de contraction « isométrique ». À l'échelle macroscopique, **les fibres musculaires peuvent se raccourcir jusqu'à 28 % lors de contractions prétendues « isométriques »**. C'est pour cette raison que des termes tels que **quasi-isométriques** sont employés ces dernières années. De plus, les auteurs mettent en évidence que le semitendineux, le semimembraneux et le BF, présentent des caractéristiques architecturales distinctes, tels que la longueur des faisceaux, l'angle de pennation, et la section transversale du muscle, ce qui influence leur capacité à générer de la force et à absorber ou libérer de l'énergie. Par exemple, les muscles semitendineux et le chef court du BF ont des faisceaux longs et un petit angle de pennation. Ils sont donc adaptés à des excursions fasciculaires plus importantes mais génèrent moins de force. En revanche, **les muscles SM et le BFlp ont des faisceaux plus courts et un plus grand angle de pennation**. Ceux-ci sont donc mieux adaptés à **la génération de force.**

Ainsi, Kalkhoven et al. (2023) apportent une explication théorique du rôle fonctionnel des IJ, tandis que Vicens-Bordas et al. (2024) fournissent des données appliquées sur l'effet des interventions d'entraînement. Les résultats de Kalkhoven et al. (2023) peuvent expliquer pourquoi les paramètres biomécaniques identifiés par Bramah et al. (2023) et Kalema et al. (2021) augmentent le risque de blessure. Si la mécanique du sprint impose des contraintes trop importantes sur un muscle qui n'est pas fait pour engendrer correctement ces dernières, cela peut mener à une surcharge et donc à une blessure. Par exemple, une flexion excessive de hanche associée à une extension de genou augmente la charge sur le BF qui est

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

particulièrement vulnérable car il fonctionne davantage comme un ressort et subit un étirement maximal à ce moment-là.

En combinant ces observations, il apparaît que la mise en contrainte des IJ serait **d'ordre multifactoriel.** Pour réduire ces risques, les différents auteurs s'accordent sur l'importance de programmes de prévention combinant à la fois **des exercices renforçant la capacité de contrainte des IJ** et **des stratégies visant à modifier les contraintes mécaniques appliquées.**

5.2.2. Optimisation de l'entraînement pour un sprint performant

Plusieurs paramètres cinématiques influencent directement la contrainte exercée sur ces muscles et leur vulnérabilité aux blessures. La revue de **Bramah et al. (2023)** explore les mécanismes sous-jacents et d'autres auteurs tels que **Vicens-Bordas et al. (2024)** proposent des stratégies d'optimisation.

⇒ Paramètres biomécaniques modifiables ?

D'une part, **le contrôle lombo-pelvien** joue un rôle capital dans la prévention des LMA. En effet, un mauvais contrôle lombo-pelvien peut altérer le transfert des forces entre le tronc et les membres inférieurs, augmentant la contrainte sur les IJ. De plus, le BFlp est directement influencé par l'inclinaison pelvienne et l'activité des muscles du tronc. Aussi, l'ilio-psoas du membre opposé provoque une rotation antérieure du bassin, allongeant le BFlp de plus de 25 mm en phase de swing terminale. Les fessiers, les adducteurs et les obliques limitent cette rotation antérieure et réduisent la contrainte sur les ischio-jambiers. Ensuite, **une inclinaison antérieure du bassin** excessive allonge les IJ en raison du déplacement postéro-supérieur de la tubérosité ischiatique. Cela augmente la contrainte sur le BFlp jusqu'à 31,5 %, 26 % pour le semi-membraneux et 13 % pour le semi-tendineux. De plus, cette inclinaison du bassin répétée influence une biomécanique de course vers un cycle postérieur, ce qui a pour conséquence d'augmenter le risque de LMA. En réponse à cette problématique, un **renforcement des muscles stabilisateurs du bassin,** notamment du **grand fessier,** est essentiel pour limiter l'inclinaison antérieure excessive. Des exercices spécifiques sur **les adducteurs** et **abdominaux profonds** (obliques, transverse) peuvent être envisagés puisque ces derniers contrôlent la rotation antérieure du bassin induite par l'action de l'ilio-psoas opposé en phase de swing terminale. Aussi, nous pouvons suggérer un **étirement de l'ilio-**

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

psoas pour limiter la traction antérieure du bassin et de la mobilité du bassin avec **des exercices de rétroversion active.**

Des exercices ciblant le contrôle pelvien, tels que **le single-leg roman chair hold** ou **le split squat avec inclinaison vers l'avan**t, sont recommandés pour améliorer la stabilité du bassin. Ces exercices visent à enseigner un contrôle pelvien optimal, limitant ainsi les inclinaisons involontaires du bassin pendant la course. L'entraînement lombo-pelvien repose sur une approche multimodale destinée à renforcer la capacité de l'athlète à maintenir une position pelvienne stable face aux perturbations mécaniques lors du sprint. Des études récentes ont montré que ce type d'entraînement permet de réduire l'inclinaison antérieure du bassin d'environ 5° pendant la phase de swing, de diminuer l'extension de la hanche à l'arrière lors du décollage des orteils et de limiter la flexion de la hanche durant le *swing*. Ces ajustements biomécaniques contribuent théoriquement à réduire la tension exercée sur les IJ pendant la course. Bien que ces études n'aient pas démontré de modifications significatives des moments de force au niveau du genou après l'entraînement, les changements dans la position pelvienne semblent entraîner une moindre variation de la longueur des IJ, réduisant ainsi la contrainte musculaire. Cependant, il est important de noter **qu'aucun essai contrôlé randomisé n'a encore prouvé que l'amélioration du contrôle lombo-pelvien diminue effectivement le risque de blessures aux IJ.**

D'autre part, **une flexion latérale et une rotation du tronc** peuvent également être des facteurs de risques. Une flexion latérale excessive du tronc vers la jambe d'appui modifie la longueur-tension des muscles stabilisateurs du bassin. Il est important de souligner qu'une instabilité du tronc altère la transmission des forces et augmente la contrainte sur le BFlp. Notons **qu'une hyperlordose lombaire (extension lombaire) semble associée à des modifications du contrôle moteur et à un risque accru de lésion des IJ. Ainsi, une extension excessive peut augmenter l'inhibition des muscles abdominaux et obliques, réduisant le contrôle pelvien.** Une meilleure stabilité pelvienne, assurée par l'activité des muscles obliques, réduirait probablement la contrainte sur l'insertion proximale des IJ tout en améliorant leur capacité à produire de la force. En effet, les travaux de Chumanov et al. montrent qu'une contraction des muscles obliques peut réduire la longueur du biceps fémoral de plus de 10 mm, et donc potentiellement la contrainte exercée sur la longue portion du biceps fémoral. **Il semble alors primordial** d'améliorer **le contrôle neuromusculaire du tronc** tout en favorisant **l'activation équilibrée des muscles abdominaux, obliques** et **lombaires** pour stabiliser la colonne vertébrale.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

La « mécanique de la face arrière » (back-side mechanics) provoque une augmentation de l'inclinaison antérieure du bassin et de la longueur des IJ, augmentant la contrainte sur le BFlp. Aussi, **une extension excessive de la jambe arrière (triple extension)**, marquée par une hyperextension du genou en phase terminale de poussée, compromet la transition rapide entre les appuis et nuit à l'économie de course. Cette mauvaise mécanique augmente la sollicitation des IJ et des muscles lombaires tout en réduisant l'activation des fessiers responsables de la propulsion. Le BFlp se retrouve alors excessivement étiré, prolongeant le temps de contact au sol et limitant le temps disponible pour repositionner le membre libre. Ces déséquilibres posturaux provoquent un mauvais alignement du bassin et conduisent souvent à une compensation par un **over-striding** (attaque du pied trop en avant), augmentant ainsi le risque de blessure et diminuant l'efficacité de la foulée.

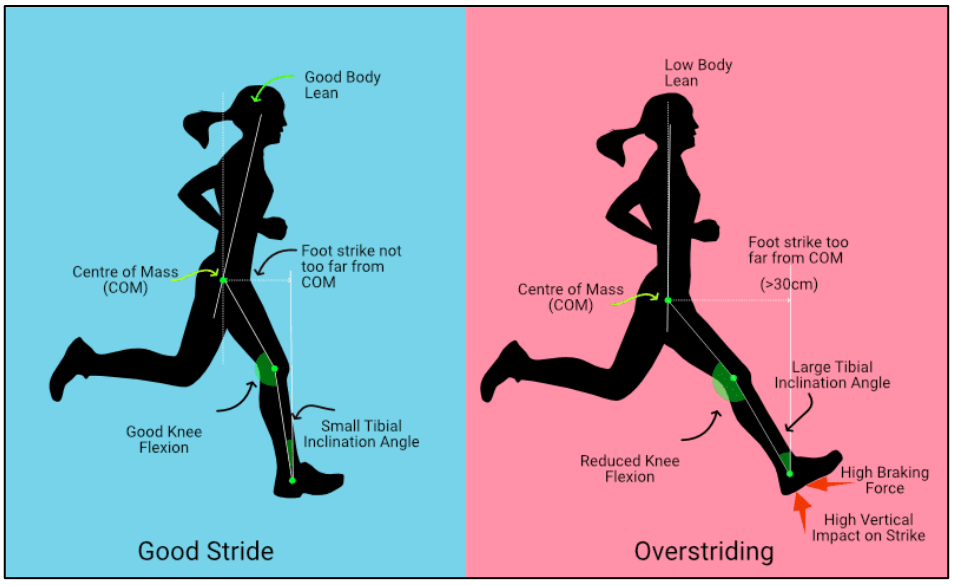


Figure 8 : Principe de l'over-striding

Les sprinteurs rapides présentent généralement une flexion de hanche plus élevée, favorisant une meilleure projection horizontale. Toutefois, une flexion excessive peut accroître la contrainte excentrique sur le BFlp et entraîner une compensation lombaire pouvant compromettre la stabilité pelvienne. Ce paramètre pourrait constituer un équilibre délicat entre performance et risque de blessure, un aspect qui sera approfondi dans la suite de la discussion.

L'over-striding (sur-allongement de la foulée) se caractérise par un contact du pied trop en avant du centre de gravité. Cette mécanique majore les forces de freinage et augmente la charge excentrique sur les IJ. Elle réduit également l'efficacité de la transition entre la phase

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

d'oscillation terminale et la phase d'appui (stance), favorisant ainsi une fatigue musculaire prématurée et un risque accru de lésions.

Les blessures aux ischio-jambiers ne dépendent pas uniquement de la force musculaire, mais aussi de la gestion du mouvement et de l'optimisation biomécanique. Pour prévenir ces blessures et optimiser la performance en sprint, il est essentiel d'améliorer le contrôle lombo-pelvien, de maîtriser l'inclinaison pelvienne ainsi que de minimiser les contraintes sur les IJ tout en augmentant la force de ces derniers.

⇒ Des exercices clés ?

Déjà, **le Nordic Hamstring (NH)** s'est imposé comme un exercice clé des blessures aux IJ, notamment grâce à des études récentes qui montrent une activité musculaire accumulée du BF, en particulier lorsque l'approche de l'extension complète du genou, une position critique pour la prévention des lésions. Bien que le NH ne respecte pas pleinement les principes de transfert spécifiques à la course, il induit des adaptations bénéfiques pour la performance et la prévention des blessures. De nombreuses études montrent que cet exercice améliore les temps de sprint sur de courtes distances (5 à 30 m) et augmente la force excentrique des IJ de 10 à 15 % après 4 à 6 semaines d'entraînement.
Même si une étude a noté une baisse minime de la vitesse de sprint suite à un programme de NH, la plupart des recherches attestent d'une progression de la force excentrique, y compris lors de contractions rapides mesurées par un dynamomètre isocinétique. Par exemple, un entraînement à vitesse contrôlée ($15°\cdot s^{-1}$) a provoqué une hausse de 12 % de la force excentrique enregistrée à $150°\cdot s^{-1}$, démontrant que ces gains se transfèrent à des vitesses plus élevées.
Cela couplé aux résultats de Street et al. (2021) incluant le programme FIFA 11+ et le Nordic Hamstring, montrant globalement une réduction de l'incidence des blessures aux IJ, bien que seules deux études contrôlées randomisées aient rapporté des résultats statistiques significativement significatifs. Globalement, **l'entraînement avec le NH améliore la performance en sprint, réduit le risque de blessure et renforce la fonction des IJ pendant la phase oscillante de la course.**

Ensuite, **l'entraînement au sprint** est essentiel pour renforcer les IJ, en particulier pour augmenter la production de couple des fléchisseurs du genou durant la phase de swing.
L'argument principal en faveur de ce type d'effort est qu'il reproduit fidèlement l'intensité et la fréquence des actions réalisées en compétition. Les exigences élevées en matière de

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

longueur/tension et les niveaux accrus d'activité EMG observés pendant le sprint (plus élevés que les exercices traditionnels) favoriseraient des adaptations architecturales optimales au sein des IJ. Cet entraînement améliore les performances sur des distances courtes (5 à 20 m) ainsi que la cinétique du sprint. De plus, il a été démontré qu'il entraîne un allongement des faisceaux du BFlp et une augmentation de la force excentrique des fléchisseurs du genou, pouvant ainsi réduire le risque de blessure (38).
Les recherches ont aussi montré qu'à des vitesses supérieures à 80 % de la vitesse maximale, la longueur musculo-tendineuse du BF reste stable tandis que la production de force augmente, soulignant l'importance d'exposer les athlètes à des courses à grande vitesse durant la rééducation. Si cela est ignoré, les IJ auraient de fortes chances d'être sous-préparés face aux contraintes élevées des compétitions. Ainsi, **la rééducation doit inclure des sprints progressifs (>80 % de la vitesse maximale),** en tenant compte de la gestion de la douleur, des distances optimales et du rythme de progression pour un retour sécurisé et performant à la compétition.

De plus, **l'entraînement avec volant d'inertie** a montré des effets positifs sur la performance et la prévention des blessures. Les études rapportent des augmentations des forces de freinage et de propulsion pendant les changements de direction, des performances améliorées ainsi que des temps de sprint sur 40 m plus rapides.
Des taux de blessures aux ischio-jambiers inférieurs ont été rapportés chez des joueurs de football effectuant un entraînement avec volant d'inertie par rapport aux témoins dans une unique étude à petite échelle. Ainsi, bien que prometteur, d'autres études sont nécessaires pour déterminer l'effet de ce mode d'entraînement sur l'incidence des blessures et la fonction des IJ pendant le sprint (38).

En parallèle, **le protocole d'Askling**, qui inclut des exercices comme le extender, diver et glider. Ce programme inclut des exercices excentriques et a démontré son efficacité en réduisant le temps de retour au sport et le risque de récidive après une blessure. Toutefois, ces exercices manquent souvent de surcharge pour induire un allongement significatif des faisceaux musculaires. Cependant, lorsqu'une charge additionnelle (entre 5 et 20 kg) est intégrée à ces exercices, des études rapportent une augmentation de la force excentrique ainsi qu'un allongement des faisceaux du BF. Ainsi, bien que le protocole d'Askling soit associé à une réduction de l'incidence des blessures, il est difficile de comparer son efficacité à celle du NH, en raison de la variabilité des charges utilisées dans les études, qui se limitent souvent au poids du corps.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Il semble important de souligner qu'il existe **une variation individuelle** notable dans l'activité musculaire des IJ lors d'exercices comme le Nordic Hamstring et Romanian Deadlift. Des recherches récentes montrent que les muscles préférentiellement activés pendant ces mouvements, notamment le BF ou le ST, varient d'un individu à l'autre. Cette spécificité pourrait limiter l'efficacité des approches de rééducation standard.

Enfin, **les exercices de type bonding**, bien qu'alignés avec les principes de transfert, montrent des résultats limités en termes d'amélioration de la fonction des IJ pendant la course. Ces exercices n'entraînent pas de réduction significative de l'incidence des blessures aux IJ lorsqu'ils sont comparés à un groupe témoin poursuivant un entraînement régulier. Cette absence de résultats significatifs suggère que les exercices de bonding ne provoquent pas les adaptations musculaires nécessaires pour résister aux fortes contraintes imposées aux ischio-jambiers pendant la phase de swing terminal du sprint. Bien que la longueur d'étirement et la vitesse de contraction pendant ces exercices soient plus représentatives du sprint que les exercices de résistance traditionnels, la force maximale des IJ est atteinte à des vitesses supérieures à 80 % de la contraction maximale. Or, la vitesse plus lente observée lors des exercices de bonding semble insuffisante pour produire les contraintes musculaires nécessaires à des adaptations protectrices.

À ce jour, les preuves soutiennent que le NH malgré son incompatibilité avec les principes de transfert, reste l'un des exercices les plus efficaces pour améliorer la force excentrique et réduire les risques de blessure. Néanmoins, des études prospectives sont encore nécessaires pour évaluer si d'autres exercices basés sur les principes de transfert pourraient également offrir des bénéfices en termes de cinématique de course et de prévention des blessures.

5.3. Comparaison avec la littérature existante

⇒ <u>Importance de la souplesse musculaire ?</u>

L'influence de la **flexibilité des IJ** sur la prévention des lésions musculaires reste un sujet **controversé** dans la littérature scientifique. Les études de **Wan et al. (2021)** et **Huygaerts et al. (2020)** illustrent bien cette divergence méthodologique et conceptuelle.

Au sein de la littérature nous retrouvons, dans une étude prospective, des joueurs de football australiens ayant expérimenté un programme d'entrainement musculaire associé à des

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

étirements après une fatigue musculaire ; le résultat montrait une réduction significative du nombre et des conséquences des blessures musculaires aux IJ (84). Certaines recherches établissent un lien entre **une faible flexibilité** et un **risque accru de blessure,** tandis que d'autres ne trouvent **aucune association significative**. Cette divergence pourrait s'expliquer par des **différences méthodologiques**, notamment en ce qui concerne **les techniques de mesure de la souplesse** et **l'absence de transposition des tests statiques à des mouvements dynamiques** comme le sprint (3, 89, 90, 91).

Des **protocoles de prévention** basés sur des **étirements dynamiques pendant l'échauffement** ont été proposés pour améliorer la flexibilité et réduire le risque de blessure. Cependant, leur **efficacité reste limitée**, car ces interventions ne semblent pas avoir d'impact majeur sur la prévention des lésions musculaires des IJ. **Opar et al.** (2012) soulignent également ce flou méthodologique dans leur **revue narrative**, où ils constatent des résultats contradictoires selon les études et les sports analysés (93). De plus, la **revue systématique et la méta-analyse de Freckleton et al.** (2013) confirment ces conclusions, n'établissant pas de consensus clair sur le rôle de la flexibilité comme facteur de prévention (94).

Cependant, **la diminution de la raideur musculaire des membres inférieurs** induite par la fatigue limite la capacité des IJ à résister aux contraintes, augmentant ainsi leurs vulnérabilités. Ce point, démontré par **Huygaerts et al. (2020),** n'est pas à négliger. C'est pourquoi, face à ces contradictions, il apparaît nécessaire que les **recherches futures** adoptent une approche plus **holistique**, en analysant **l'interaction entre les différents facteurs de risque** plutôt que de les évaluer de manière **isolée.** Une compréhension plus globale de la **relation entre la flexibilité, la fatigue musculaire et la biomécanique du sprint** permettrait d'élaborer des **stratégies de prévention plus efficaces** et adaptées aux exigences spécifiques des sportifs.

Or, aucune étude n'a à ce jour démontré les bénéfices des étirements associés à la fatigabilité musculaire dans la prévention des lésions musculaires aux IJ.

⇒ Quels exercices retenir ?

Une activation ciblée est essentielle pour réduire les risques de blessures musculaires, notamment chez les sprinteurs et footballeurs. C'est pour cette raison qu'il faut être précis dans le choix des consignes pour une optimisation de l'activation ciblé, et la levée des potentielles inhibitions neuro-musculaire comme le souligne **Vicens-Bordas et al. (2024)** au sein de leur revue.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

L'étude systématique de **Llurda-Almuzara et al. (2021)** a évalué l'activation du BF lors de divers exercices de renforcement des IJ. Les résultats indiquent que **les exercices isocinétiques**, **le Nordic Hamstring (NH)**, le Romanian Deadlift, le Hip Trust et le Leg Curl sont ceux qui sollicitent le plus le BF, avec une activation dépassant 60 % de la contraction isométrique volontaire maximale (95). Notamment, **le NH avec dorsiflexion de la cheville** atteint une activation de 128,1 % de la contraction isométrique volontaire maximale. Les auteurs exploitent stratégiquement les interactions entre les pivots hanche et genou afin de mieux cibler les atteintes proximales et distales.

Ces conclusions corroborent les travaux de **Vicens-Bordas et al. (2024)**, qui ont démontré que le NH améliore la force excentrique des IJ.De plus, **Prince et al. (2021)** ont démontré que, bien que leurs résultats indiquent que le **NH effectué à 90° de flexion de la hanche** présente une spécificité par rapport au sprint en termes de production de force, l'étude a également révélé que l'activité musculaire des IJ pendant cet exercice est significativement plus faible que celle observée lors du sprint (102). Ainsi, **seul le sprint maximal** permet d'atteindre une activation élevée des IJ. Par conséquent, l'intégration d'exercices tels que le NH dans les programmes d'entraînement, en complément des séances de sprint, est recommandée pour optimiser la performance et prévenir les lésions des ischio-jambiers.

Enfin, **Mendiguchia et al. (2017)** démontre que les footballeurs masculins ayant suivi un **algorithme individualisé, multifactoriel** et basé sur des critères (intégrant le séquençage temporel des **différents facteurs de risque potentiels** liés aux blessures aux IJ,- c'est-à-dire, **mauvaise flexibilité**, **force diminuée**, **contrôle lombo-pelvien altéré**, **fatigue**, etc - avec un programme d'entraînement axé sur la performance et les principaux facteurs de risque dès les premières étapes du processus), combiné à un programme d'entraînement axé sur la performance et les principaux facteurs de risque dès les premières étapes du processus, ont significativement réduit le risque de récidive par rapport à un protocole général privilégiant les exercices de renforcement musculaire de longue durée (**bien que le retour au sport ait été légèrement plus lent dans la premier groupe**) (101). Ainsi, **Mendiguchia et al. (2017)** rejoint **Bramah et al. (2023)** préconisant une approche multifactorielle et prenant en compte une combinaison de paramètres cinématiques et cinétiques susceptibles d'interagir pour influencer les tensions exercées sur les muscles IJ.

Globalement, le choix des exercices est essentiel dans la prévention des LMA, notamment ceux impliquant le plus les IJ. C'est pourquoi, le NH (**avec dorsiflexion de la cheville** et/ou **effectué à 90° de flexion de la hanche), les exercices isocinétiques** ainsi que **le sprint à vitesse maximale** permettront de recruter au maximum les IJ. Cependant, **une approche**

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

individualisée intégrant différents facteurs de risques associés semble s'intégrer de plus en plus dans les protocoles de préventions.

⇒ Quid de l'isocinétisme ?

Un déséquilibre musculaire entre les quadriceps et les IJ (Hamstring/Quadriceps) est fréquemment observé, augmentant la sollicitation des muscles postérieurs de la cuisse. Cela amène à l'intérêt d'un **test isocinétique** afin de proposer des méthodes de renforcement musculaire aux athlètes.

Cependant, la pertinence de ce ratio comme facteur prédictif des blessures est aujourd'hui contestée. **Freckleton et al. (2013)**, dans une méta-analyse, ne retrouvent **aucune association significative entre un déséquilibre du ratio Hamstring/Quadriceps** et **un risque accru de blessure aux IJ.** Ces résultats remettent en question l'idée selon laquelle un ratio déséquilibré serait directement lié à une augmentation du risque de déchirure musculaire (94).

À l'inverse, **Opar et al. (2013)** soutiennent que **ce déséquilibre peut influencer le risque de blessure**, notamment lorsqu'il n'est pas compensé par des programmes de renforcement spécifiques. Ils expliquent que la correction des déficits musculaires par des exercices excentriques permettrait de réduire le taux de blessures (93). Cette divergence souligne l'importance de ne pas considérer le ratio H/Q comme un indicateur isolé, mais de l'intégrer dans une approche plus globale prenant en compte plusieurs paramètres biomécaniques.

L'étude de **Van Dyk et al. (2016)** révèle que les différences de force isocinétique (notamment la force excentrique des IJ et la force concentrique des quadriceps) entre les joueurs blessés et non blessés sont minimes et présentent une faible capacité prédictive des lésions. Cela suggère que l'évaluation isolée de la force musculaire n'est pas suffisante pour identifier les athlètes à risque (96)

Ainsi, nous ne pouvons pas nous appuyer sur les tests isocinétiques afin de prévenir les lésions aux IJ. Cependant, **les exercices isocinétiques peuvent s'avérer utiles** pour accroître la force musculaire des IJ et augmenter leurs capacités à supporter les contraintes.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

⇒ Quel(s) effort(s) sont les plus à risques ?

Un autre facteur clé est la vitesse de course et les variations d'intensité. Lorsque le sportif court à des vitesses proches de sa vitesse maximale (plus de 85 % de celle-ci) et qu'il doit fréquemment accélérer ou décélérer, cela sollicite fortement les IJ. Ces changements rapides de rythme, combinés à des distances importantes parcourues à haute vitesse (>24 km/h), augmentent le stress musculaire et donc le risque de blessures. En résumé, ce n'est pas seulement la vitesse élevée qui est risquée, mais surtout **les variations d'intensité** et **les pics de volume d'effort à grande vitesse** qui sollicitent excessivement les IJ (85).

L'étude de **Edouard et al. (2024)** a montré que le risque de subir une LMA aux IJ lors d'épreuves de sprint est plus élevé lors des finales que lors des tours précédents des championnats internationaux d'athlétisme (20). De plus, l'intensité de l'effort en finale est plus élevée, avec des vitesses de course plus rapides, ce qui augmente la sollicitation musculaire des IJ. Ainsi, la gestion de la fatigue et du stress, ainsi qu'une préparation physique spécifique pour les efforts répétés en compétition, sont essentielles pour réduire le risque de blessures dans les finales. Aussi, **Opar et al. (2013)** ont démontré que le risque de blessure aiguë est plus élevé dans les épreuves de 400 m que dans celles de 100 m (16).

En d'autres termes, si la fatigue perturbe la coordination et les propriétés musculaires comme le souligne **Huygaerts et al. (2020),** cela explique les nombreuses blessures recensées lors des finales de grands championnats. Par conséquent, une technique de course non optimale associée à un état de fatigue pourrait exacerber la tension sur les IJ et augmenter le risque de blessure.

⇒ Biomécanique des IJ

D'autres paramètres biomécaniques ont été identifiés dans la littérature :

L'architecture musculaire des IJ est également un facteur déterminant (86). Une étude a démontré que les joueurs de football présentant une longueur de fascicule du BFlp inférieure à 10,56 cm sont 4 fois plus susceptibles de se blesser que ceux ayant des fascicules plus longs (87). De plus, une force excentrique maximale inférieure à 337 Newtons est associée à un risque accru de lésion musculaire. Ces résultats suggèrent que **la longueur optimale des fascicule**s et **la capacité du muscle à absorber des contraintes excentrique**s sont des paramètres modifiables à prendre en compte dans les stratégies de prévention. Ainsi, des protocoles de renforcement excentrique, tels que le NH ou le programme FIFA 11+, peuvent améliorer la longueur des fascicules et la résistance musculaire, réduisant ainsi le risque de blessure (88).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Un déficit d'amplitude articulaire en **extension de hanche** a également été identifié comme un facteur contributif aux lésions des IJ (58, 94). **Gabbe et al. (2005)** rapportent qu'une diminution d'un degré sur le test de Thomas modifié augmente le risque de blessure de 15 %. Ainsi, les joueurs ayant **une souplesse accrue des quadriceps** étaient moins susceptibles de subir une blessure aux IJ. En effet, cette perte de flexibilité des fléchisseurs de hanche pourrait perturber la mécanique des IJ pendant la course, augmentant ainsi la charge musculaire (104). Cependant, ces conclusions restent hypothétiques et nécessitent des recherches supplémentaires pour établir un lien de causalité direct. Cela concorde avec les résultats de **Bramah et al. (2023)** concernant l'ilio-psoas qui joue un rôle majeur dans l'orientation pelvienne et l'étirement des IJ pendant la course. Ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle une perte de flexibilité des fléchisseurs de hanche et un contrôle lombo-pelvien altéré sont des facteurs de risque de blessure.

⇒ <u>Performance VS blessure ?</u>

Les sprinteurs rapides présentent généralement une flexion de hanche plus élevée, favorisant une meilleure projection horizontale. Toutefois, une flexion excessive peut accroître la contrainte excentrique sur le BFlp et entraîner une compensation lombaire pouvant compromettre la stabilité pelvienne. Ce paramètre pourrait représenter **un compromis entre performance et blessure.** De plus, Higashihara et al. (2019) et Lee et al. (2009) ont trouvé des résultats divergents, mais leur analyse a convergé vers l'idée qu'une réduction de cet angle pourrait constituer une stratégie post-blessure visant à protéger les IJ.

Les travaux de Clark et al. (2020) et de Sides (2015) soutiennent ce concept, les sprinteurs plus rapides ayant observé des angles de flexion maximale de la hanche plus grands, des angles d'extension de la hanche plus petits et des vitesses d'extension et de flexion de la cuisse plus élevées pendant la position et le swing terminal (105, 106).

Aussi, l'over-striding (sur-allongement de la foulée) se caractérisant par un contact du pied trop en avant du centre de gravité et majorant les forces de freinage en augmentant la charge excentrique sur les IJ. Elle réduit également l'efficacité de la transition entre la phase d'oscillation terminale et la phase d'appui (stance), favorisant ainsi une fatigue musculaire prématurée et un risque accru de lésions. D'autant plus que ces éléments sont encore plus marqués lors d'un état de fatigue

Ainsi, l'interaction entre performance et protection des tissus reste complexe et nécessite une approche individualisée. En situation post-lésionnelle, il serait pertinent de limiter les

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

paramètres identifiés comme facteurs de risque. Toutefois, sur le long terme, cette responsabilité incombe aux entraîneurs des clubs et fédérations, qui devront adapter leur gestion en fonction des exigences spécifiques de chaque athlète.

⇒ Le contrôle lombo-pelvien, l'avenir ?

Plusieurs articles inclus au sein de notre revue ont mis en lumière l'importance du contrôle lombo-pelvien dans le protocole de prévention des LMA (Bramah et al., Vicens-Bordas et al., Kalema et al.). Cependant, dans la littérature existante, nous pouvons observer plusieurs études qui expérimentent cette théorie.

L'étude de **Astrella et al. (2024)** a examiné la contrainte subie par le muscle-tendon du BF tout au long d'un sprint d'accélération sur 40 mètres chez 21 footballeurs semi-professionnels masculins. Des modèles musculo-squelettiques à l'échelle ont été utilisés pour estimer la tension maximale des IJ sur 16 pas. Le BFlp présentait les pics de tension les plus importants par rapport aux muscles ST et SM sur toutes les étapes, sa tension globale diminuant à mesure que **le nombre de pas** et **la vitesse maximale augmentaient**. **L'angle de flexion de la hanche** et **l'orientation pelvienne** s'est avéré être un bon prédicteur sur la contrainte maximale du BFlp pendant le sprint (97). L'étude actuelle fournit une explication biomécanique de la forte proportion de blessures aux ischio-jambiers dans la phase d'accélération du sprint.

De plus, **Mendiguchia et al. (2024)** ont démontré que l'augmentation de l'inclinaison antérieure du bassin a entraîné une augmentation significative et non uniforme de l'allongement des tissus dans toutes les régions des trois muscles IJ que sont le SM, le ST ainsi que le BFlp, qui était plus importante dans la région proximale (> 1 cm tous les 5°) que dans la région distale (≈ 0,4 cm tous les 5°). Dans la région proximale des ischio-jambiers, le SMB a montré des changements de longueur significativement plus importants que les tendons conjoints avec des différences d'allongement non statistiquement significatives entre les muscles de la région distale (98).

Enfin, **l'étude de Lewis et al. (2023)** visait à examiner la cinématique pelvienne pendant la course à grande vitesse dans le plan frontal de sprinters de niveau universitaire d'élite, avec et sans blessure antérieure aux IJ, par rapport à leurs homologues en bonne santé. Les sprinteurs blessés ont montré un mouvement médiolatéral et une asymétrie significativement plus importante pendant les appuis que leurs homologues sains. Ainsi, cela démontre que la

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

dynamique de la posture de course sur le plan frontal est différente chez les athlètes ayant subi une blessure aux ischio-jambiers par rapport aux athlètes en bonne santé. Ces athlètes peuvent bénéficier de stratégies de rééducation ciblant le contrôle postural et la stabilité lors des tâches dynamiques (99).

Au vu de ces multiples résultats, le segment pelvien jouera probablement un rôle fondamental en tant que régulateur de tension des muscles IJ. Ces résultats pourront avoir un impact sur les processus de rééducation et de prévention des blessures. Cependant, il est essentiel de souligner **qu'aucun essai contrôlé randomisé n'a encore apporté de preuve formelle que l'amélioration du contrôle lombo-pelvien réduit efficacement le risque de blessures aux IJ.**

⇒ <u>Prédisposition naturelle aux lésions ?</u>

Un autre facteur est **l'ethnie** (81,82,83). Des recherches ont indiqué que les Aborigènes d'Australie ainsi que les populations noires d'Afrique et des Caraïbes pourraient être davantage susceptibles de subir une rupture musculaire des IJ. Ceci s'explique par un pourcentage en fibres rapide (type 2) différent en fonction des ethnies. Certaines populations comme les populations africaines seraient plus à risque à cause de leur composition musculaire plus riches en fibres de type 2 (82). Aussi, Woods et al. (111) ont montré une incidence plus importante de lésions aux IJ chez les joueurs les plus âgés et également un taux plus important de blessures chez les joueurs d'origine ethnique africaine.

Toutefois, en raison de la qualité faible des preuves dans ces études, il faut aborder l'ethnicité comme un facteur de risque avec prudence.

Il est important de rappeler que, d'un point de vue évolutif, l'être humain est biologiquement peut adapter à la course de vitesse. Comme le souligne Lieberman et al. (119), l'Homo sapiens, s'est davantage spécialisé dans la course de longue distance que dans le sprint. À l'échelle des mammifères, l'humain figurent parmi les espèces les plus lente, et même les meilleur sprinter humain sont largement distancer par de nombreux animaux tels que les chiens ou les chevaux. Ce constat rappelle que notre organisme n'est pas naturellement conçu pour tolérer les contraintes biomécaniques extrême du sprint, ce qui pourrait en partie, expliquer la forte incidence de certaines blessures, notamment au niveau des ischio-jambiers.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

⇒ Quels sont les critères et tests validés permettant d'affirmer le retour au sport ?

L'évaluation de la force des IJ est fréquemment utilisée dans la décision du retour au sport. Deux méthodes principales sont relevées, dont **l'évaluation isométrique** via un dynamomètre manuel. Selon l'étude de De Vos et al. (113), un déficit de force à 15° de flexion du genou est associé à un risque accru de récidive. Toutefois, l'absence de précision sur une différence tolérée entre les deux membres complique l'interprétation des résultats. Mendiguchia et Brughelli (112) recommandent **un écart de force inférieur à 10 %** pour valider un retour au sport, soulignant la nécessité d'un cadre plus précis pour cette évaluation. Bien que ce critère soit souvent cité dans les protocoles de rééducation, peu d'études analysent son impact sur la récidive, à l'exception de celle de De Vos et al.
Ainsi, bien que l'évaluation de la force musculaire des IJ soit pertinente, son interprétation et son utilisation nécessitent davantage de précisions méthodologiques.

Une méta-analyse récente (114) a montré que les déficits de force isométrique se résolvent entre 20 et 50 jours après la blessure, bien avant la reprise du sport, tandis que les déficits persistants concernent principalement la force excentrique et concentrique. Ces résultats suggèrent que la surveillance de la force dynamique pourrait être plus pertinente que l'évaluation isométrique au moment du retour au jeu. De plus, prolonger la rééducation après la reprise sportive pourrait aider à corriger les déficits résiduels. En conclusion, l'absence de consensus sur les méthodes d'évaluation et les seuils de différenciation complique la prise de décision clinique. De nouvelles recherches sont nécessaires, mais il semble raisonnable, comme le suggère Valle et al., de ne pas tolérer une asymétrie supérieure à 20 % avant d'autoriser la reprise du sport. (115)

L'évaluation de la flexibilité des IJ à l'aide du **test d'extension active du genou (AKE test)** semble être un critère pertinent pour autoriser le retour au sport, car un déficit à ce test est associé à un risque accru de récidive. Cependant, peu d'études ont analysé son efficacité, et les résultats restent contradictoires, comme le montre l'étude de Warren et al. (116), qui ne trouve pas de lien significatif avec le risque de rechute. Un autre test, **le H-test d'Askling**, permet d'évaluer à la fois la flexibilité et l'appréhension du sportif. Il a été associé à un taux de récidive particulièrement bas (1,3 % à 3,6 %), bien inférieur aux taux habituels (14 % à 63 %). Toutefois, son utilisation semble prolonger le délai de retour au sport, et son efficacité seule n'a pas été clairement démontrée, car il est souvent combiné à d'autres tests (117). De plus, les principales études sur ce test ont été menées par son concepteur, et certaines données ne sont pas publiées, ce qui constitue un biais méthodologique important (81). Ainsi, bien que

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

le H-test soit intégré dans plusieurs protocoles de rééducation, son rôle exact dans la prise de décision du retour au sport nécessite encore des recherches supplémentaires pour être objectivé. (52, 58, 101).

L'absence de douleur ou d'inconfort à la palpation des IJ est un critère fréquemment utilisé pour autoriser le retour au sport, car une douleur résiduelle après la reprise est significativement associée à un risque accru de récidive. Cependant, ce test souffre d'un manque de standardisation, les auteurs ne précisant pas clairement ce qu'ils qualifient de douleur ou d'inconfort. L'absence de seuil défini, notamment via une échelle numérique de la douleur (EN), et la variabilité de la pression exercée lors de la palpation peuvent biaiser les résultats. Pour limiter ces biais, De Vos et al. suggèrent que le test soit réalisé par un unique investigateur (113). Malgré ces limites, la littérature s'accorde sur l'importance de ce critère, largement intégré dans les protocoles de rééducation pour valider la progression des phases. Ainsi, bien que reposant sur une évaluation subjective, l'absence de douleur à la palpation reste une condition essentielle pour autoriser un retour au sport en toute sécurité. (59, 79, 101)

Pour finir, les tests Jurdan test et Kick-back test font partie des éléments centraux de la thèse de Johan Lahti (92). Ces nouveaux outils de dépistage permettent d'identifier les athlètes présentant des risques de blessures aux IJ. Le Jurdan test est un test fonctionnel au mouvement du sprint et qui permet d'évaluer la flexibilité active des IJ en tenant compte de la limitation passive des fléchisseurs de hanche. En ce qui concerne le Kick-back test, ce dernier a pour intérêt d'analyser la cinématique lombo-pelvienne pendant le sprint à partir d'une mesure des angles de cuisse capturé en vidéo. Ces deux tests, encore peu réputés dans la littérature scientifique, offrent une approche spécifique au geste sportif et prometteuse pour une prévention individualisée des blessures.

5.4. Forces et limites de l'étude

Cette revue de littérature se distingue par son approche multidimensionnelle, combinant des études expérimentales et narratives, permettant ainsi d'examiner notre problématique. L'intégration de différentes thématiques tels que les facteurs biomécaniques, les effets de la fatigue et les interventions préventives, offre une vision globale du sujet. De plus, l'utilisation de grilles d'évaluation reconnues telles que SANRA pour les revues narratives et PEDro pour les études expérimentales a permis de s'assurer d'une analyse critique de la qualité des études pris en comptes dans notre thèse.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Cependant, malgré cette approche globale, plusieurs limites méthodologiques doivent être soulignées. Tout d'abord, l'un des principaux biais repose sur la présence d'un seul auteur pour la réalisation de cette revue de littérature, que ce soit pour la sélection des études dans les différentes bases de données, pour l'évaluation des biais à travers l'échelle SANRA et PEDro, ou encore pour l'extraction des données relatives à chaque étude. Ainsi, la réalisation de la revue par un seul étudiant entraîne donc une sélection, une extraction des données et une évaluation de la qualité méthodologique subjective.

D'autres limites concernent principalement la qualité globale des données issues des revues incluses, le nombre relativement restreint d'études disponibles, ainsi que l'hétérogénéité des études, tant au niveau des protocoles méthodologiques que des critères d'évaluation. Cette variabilité rend difficile la comparaison directe des résultats et limite la possibilité d'établir des conclusions généralisables. Aussi, un autre point à souligner est l'absence de données longitudinales suffisantes pour confirmer l'efficacité des interventions sur le long terme, notamment en ce qui concerne l'adaptation biomécanique après une intervention préventive. Cette lacune empêche de déterminer si les modifications biomécaniques observées après des exercices spécifiques se traduisent réellement par une réduction durable du risque de lésion des IJ.

Enfin, la représentativité limitée des populations féminines et des jeunes athlètes constitue une faiblesse majeure. La majorité des études analysées se concentrent sur des athlètes masculins adultes, laissant un vide concernant l'applicabilité des résultats à d'autres groupes. Cette limitation suggère un biais d'échantillonnage qui réduit la portée clinique des recommandations formulées et souligne l'importance d'étendre les recherches futures à ces populations sous-représentées.

5.5. **Perspectives et implications cliniques**

Pour améliorer la prise en charge clinique, l'intégration des données biomécaniques dans les protocoles de prévention est essentielle. Les cliniciens et préparateurs physiques doivent adopter une approche multifactorielle. Face à la difficulté d'établir un lien direct entre la technique de course et les LMA, ainsi que de standardiser des protocoles chez les individus les plus atteints, une approche personnalisée et adaptative pourrait être nécessaire pour affiner les stratégies de prévention et de rééducation.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

D’une part, pour analyser l’impact d’une LMA antérieure sur la biomécanique du sprint, **des études transversales** peuvent être menées en recrutant des groupes homogènes. Une **lésion récente** pourrait être un critère de recrutement et celle-ci devrait être confirmé par **imagerie** (IRM), concerner **le même muscle** (par exemple, le BFlp), résulter d’un **mécanisme similaire** (une blessure liée au sprint) et être d’une **gravité suffisante** pour avoir nécessité un arrêt prolongé de l’entraînement et/ou de la compétition.

D’autres part, **des études prospectives** à grande échelle restent essentielles afin d’identifier les variables biomécaniques du sprint associées au risque de LMA. Il serait intéressant de développer des interventions personnalisées en utilisant **des analyses cinématiques avancées** pour adapter la charge d’entraînement aux profils individuels. **L’individualisation des programmes d’entraînement** et **de musculation** pourrait donc permettre d’identifier les déficits spécifiques et de corriger les altérations mécaniques avant qu’elles ne deviennent pathologiques. Toutefois, leur mise en œuvre demeure complexe en raison de la difficulté à constituer une cohorte avec un nombre suffisant de cas (blessures initiales et/ou récidives). Une solution potentielle résiderait dans **la mise en place de collaborations** entre plusieurs groupes de recherche partageant des intérêts communs, une approche adoptée récemment par Edouard et al. (100). Aussi, l’étude récente de Bramah et al. (2025) figure parmi les premières études visant à identifier les mécanismes du sprint associés à de futures blessures des ischio-jambiers dans le football d’élite (118). Celle-ci propose un outil clinique prometteur d’évaluation biomécanique, le Sprint Mechanics Assessment Score (S-MAS), qui pourrait permettre d’identifier les profils de course les plus à risque de développer une lésion aux ischio-jambiers. Cependant, cette étude doit être interprétée avec précaution (faible niveau de preuve malgré le modèle de cohorte). Pour autant, cette approche peut s’avérer pionnière et pourrait enrichir les stratégies individualisées de prévention à l’avenir.

Un défi majeur identifié dans les études inclues réside dans le manque de méthodes fiables et reproductibles pour analyser la biomécanique du sprint sur le terrain. Il est essentiel de développer **des outils portables**, comme les systèmes d’analyse inertielle, l’imagerie musculo-squelettique ou des solutions de capture de mouvement simplifiée, permettant de mesurer en conditions réelles des paramètres clés tels que l’inclinaison du tronc et du bassin lors du sprint. De plus, la relation entre les facteurs structurels, tels que la longueur musculaire et les attaches anatomiques (par exemple l’attache du biceps fémoral au ligament sacrotubéral), et les mécanismes lésionnels doit être étudiée plus en détail.

Bien que l’efficacité des exercices excentriques soit bien documentée, l’impact durable de ces interventions sur la biomécanique du sprint reste peu exploré. Des recherches futures

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

devraient examiner sur **la durabilité des adaptations biomécaniques** après la cessation de l'entraînement. L'effet combiné d'exercices lombo-pelviens et de renforcement excentrique seraient également enrichissant sur la réduction de la tension musculaire. Les actions excentriques peuvent aller de la mise en place d'exercice simple comme le Nordic Hamstring à l'application de programmes élaborés intégrant de nombreux exercices, comme le programme FIFA 11+. Il serait curieux également d'étudier l'influence des facteurs environnementaux et des charges spécifiques liées aux périodes de haute intensité dans les sports.

Enfin, les différentes recherches devraient se faire de manière plus importante qu'actuellement en milieu amateur. Les joueurs/clubs amateurs sont extrêmement nombreux (bien plus qu'en milieu professionnel) et sont pour la grande majorité non alertés sur les risques inhérents à cette pathologie. De plus, la majorité des études actuelles se concentrent sur des athlètes masculins adultes. Pourtant, les différences de morphologie et d'activation musculaire entre les sexes et les âges peuvent influencer le risque de blessure aux IJ.
Ainsi, si ces multiples approches sont guidées par des preuves scientifiques robustes, peuvent offrir des perspectives prometteuses pour la prise en charge et la prévention des blessures dans les sports de haute intensité.

6. Conclusion

Étant animé par la passion du sprint depuis le plus jeune âge, c'est donc tout naturellement que mon mémoire de fin d'étude soit consacré à l'une des pathologies les plus redoutées dans ce domaine : la lésion myo-aponévrotique des ischio-jambiers.

Cette revue de la littérature a permis de mettre en évidence l'importance de la biomécanique de course dans le mécanisme lésionnel des ischio-jambiers, soulignant ainsi une opportunité précieuse pour approfondir les recherches sur ce lien étroit. En effet, nous avons pu explorer les facteurs biomécaniques potentiels, l'influence de la fatigue sur ces derniers, ainsi que l'efficacité des interventions pour mieux comprendre et prévenir ces blessures courantes.

Nos résultats soulignent la nécessité d'approches personnalisées pour prévenir et gérer les lésions myo-aponévrotiques. Chaque athlète présente des caractéristiques biomécaniques uniques qui doivent être évaluées au moyen de tests spécifiques. Malheureusement, les preuves actuelles disponibles n'ont pas été en mesure de fournir une perspective claire et non contradictoire sur le lien potentiel entre la biomécanique du sprint et les lésions musculaires

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

aux ischio-jambiers. Cette lacune méthodologique pourrait expliquer les progrès limités dans ce domaine, ainsi que le taux élevé de récidives observé chez les athlètes. En effet, à travers cette thèse nous avons observé une absence de méthodes standardisées sur le terrain pour évaluer la biomécanique du sprint afin d'identifier des paramètres absolus nécessitant ou non d'une correction. Sans de tels procédés, la capacité à identifier de manière fiable les personnes susceptibles de bénéficier d'interventions mécaniques ciblées reste limitée.

En réponse à cette difficulté, une approche multifactorielle serait pertinente, intégrant une combinaison de paramètres cinématiques et cinétiques susceptibles d'interagir pour influencer les tensions exercées sur les muscles ischio-jambiers. Ainsi, pour réduire ce risque, les programmes de prévention doivent viser à réduire les contraintes mécaniques appliquées et renforcer la capacité des tissus à supporter ces contraintes.

En espérant que cette revue serve de base pour de futures recherches qualitatives et apporte des réponses approfondies sur ce sujet.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Bibliographie

1. Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. Démarche et posture, 7(1), 77-95. https://doi.org/10.1016/s0966-6362(97)00038-6

2. Thelen, D. G., Chumanov, E. S., Sherry, M. A., & Heiderscheit, B. C. (2006). Neuromusculoskeletal models provide insights into the mechanisms and rehabilitation of hamstring strains. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 34*(3), 135-141. https://doi.org/10.1249/00003677-200607000-00008

3. Mendiguchia, J., Alentorn-Geli, E., & Brughelli, M. (2012). *Hamstring strain injuries: are we heading in the right direction? British Journal of Sports Medicine, 46*(2), 81-85. https://doi.org/10.1136/bjsm.2010.081695

4. Calderón-Díaz, M., Aguirre, R. S., Vásconez, J. P., Yáñez, R., Roby, M., Querales, M., & Salas, R. (2023). Explainable machine learning techniques to predict muscle injuries in professional soccer players through biomechanical analysis. Sensors, 24(1), 119. https://doi.org/10.3390/s24010119

5. Bramah, C., Mendiguchia, J., Dos'Santos, T., & Morin, J.-B. (2024). Exploring the role of sprint biomechanics in hamstring strain injuries: A current opinion on existing concepts and evidence. *Sports Medicine, 54*(4), 783-793. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01925-x

6. Mendiguchia, J., Garrues, M. A., Schilders, E., Myer, G. D., & Dalmau-Pastor, M. (2024). Anterior pelvic tilt increases hamstring strain and is a key factor to target for injury prevention and rehabilitation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 32*(3), 573-582. https://doi.org/10.1002/ksa.12045

7. Azzopardi, C., Almeer, G., Kho, J., Beale, D., James, S. L., & Botchu, R. (2020). Hamstring origin-anatomy, angle of origin and its possible clinical implications. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma, 13*, 50-52. https://doi.org/10.1016/j.jcot.2020.08.021

8. Goode, A. P., Reiman, M. P., Harris, L., DeLisa, L., Kauffman, A., Beltramo, D., Poole, C., Ledbetter, L., & Taylor, A. B. (2015). Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 49*(6), 349-356. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093466

9. Shield, A., & Murphy, S. (2018). Preventing hamstring injuries—Part 1: Is there really an eccentric action of the hamstrings in high-speed running and does it matter? *Sport Performance & Science Reports*. https://sportperfsci.com

10. Van Hooren, B., & Bosch, F. (2018). Preventing hamstring injuries - Part 2: There is possibly an isometric action of the hamstrings in high-speed running and it does matter. https://sportperfsci.com/wp-content/uploads/2018/04/SPSR28_HS-serie_Bas-Bosch_180418_final.pdf

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

11. Edouard, P., Lahti, J., Fleres, L., Ahtiainen, J., Ulvila, J.-J., Lehtinen, T., Virtanen, N., Taipale, T., Bellver, M., Peltonen, V., Thibault, M., Huuhka, T., Toivonen, R.-M., Morin, J.-B., & Mendiguchia, J. (2024). A musculoskeletal multifactorial individualised programme for hamstring muscle injury risk reduction in professional football: Results of a prospective cohort study. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine, 10*(1), e001866. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2023-001866

12. Marine, P., Forelli, F., Edouard, P., Morin, J.-B., & Rambaud, A. J. M. (2023). Place du profil force-vitesse dans la prise en charge du retour au sport après lésion des ischio-jambiers en football. *Journal de Traumatologie du Sport, 40*(1), 13-20. https://doi.org/10.1016/j.jts.2022.12.005

13. Petersen, J., Thorborg, K., Nielsen, M. B., Budtz-Jørgensen, E., & Hölmich, P. (2011). Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: A cluster-randomized controlled trial. *American Journal of Sports Medicine, 39*(11), 2296-2303. https://doi.org/10.1177/0363546511419277

14. Van Dyk, N., Behan, F. P., & Whiteley, R. (2019). Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: A systematic review and meta-analysis of 8459 athletes. *British Journal of Sports Medicine, 53*(21), 1362-1370. https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100045

15. Presland, J. D., Timmins, R. G., Bourne, M. N., Williams, M. D., & Opar, D. A. (2018). The effect of Nordic hamstring exercise training volume on biceps femoris long head architectural adaptation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 28*(7), 1775-1783. https://doi.org/10.1111/sms.13085

16. Opar, D. A., Drezner, J., Shield, A., Williams, M., Webner, D., Sennett, B., Kapur, R., Cohen, M., Ulager, J., Cafengiu, A., & Cronholm, P. F. (2014). Acute hamstring strain injury in track-and-field athletes: A 3-year observational study at the Penn Relay Carnival. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 24*(4), e254-e259. https://doi.org/10.1111/sms.12159

17. Yeung, S. S., Suen, A. M. Y., & Yeung, E. W. (2009). A prospective cohort study of hamstring injuries in competitive sprinters: Preseason muscle imbalance as a possible risk factor. *British Journal of Sports Medicine, 43*(8), 589-594. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.056283

18. Della Villa, F., Massa, B., Bortolami, A., Nanni, G., Olmo, J., & Buckthorpe, M. (2023). Injury mechanisms and situational patterns of severe lower limb muscle injuries in male professional football (soccer) players: A systematic video analysis study on 103 cases. *British Journal of Sports Medicine, 57*(24), 1550-1558. https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106850

19. Gronwald, T., Klein, C., Hoenig, T., Pietzonka, M., Bloch, H., Edouard, P., & Hollander, K. (2022). Hamstring injury patterns in professional male football (soccer): A systematic video analysis of 52 cases. *British Journal of Sports Medicine, 56*(3), 165-171. https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-104769

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

20. Edouard, P., Dandrieux, P.-E., Junge, A., Navarro, L., Giroux, C., Guex, K., Branco, P., Guilhem, G., & Hollander, K. (2024). **Is the risk of muscle injuries higher in the finals than in previous rounds of the 100 m, 200 m and 400 m sprints of international athletics championships?** *Journal of Science and Medicine in Sport, 27*(5), 302-306. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.02.007

21. Finni, T., de Brito Fontana, H., & Maas, H. (2023). Force transmission and interactions between synergistic muscles. Journal of Biomechanics, 152, 111575. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111575

22. Cadellans-Arróniz, A., López-de-Celis, C., Rodríguez-Sanz, J., Pérez-Bellmunt, A., Labata-Lezáun, N., González-Rueda, V., Llurda-Almuzara, L., & Rodríguez-Rubio, P. R. (2022). Immediate effects of diacutaneous fibrolysis in athletes with hamstring shortening: A randomized within-participant clinical trial. PLoS One, 17(7), e0270218. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270218

23. Ekstrand, J., Hägglund, M., & Waldén, M. (2011). Injury incidence and injury patterns in professional football: The UEFA injury study. *British Journal of Sports Medicine*, *45*(7), 553–558. https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.060582

24. Hawkins, R. D., Hulse, M. A., Wilkinson, C., Hodson, A., & Gibson, M. (2001). The association football medical research programme: An audit of injuries in professional football. *British Journal of Sports Medicine*, *35*(1), 43–47. https://doi.org/10.1136/bjsm.35.1.43

25. Henderson, G., Barnes, C. A., & Portas, M. D. (2010). Factors associated with increased propensity for hamstring injury in English Premier League soccer players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *13*(4), 397–402. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.08.003

26. Woods, C., Hawkins, R. D., Maltby, S., Hulse, M., Thomas, A., & Hodson, A. (2004). The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football—Analysis of hamstring injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *38*(1), 36–41. https://doi.org/10.1136/bjsm.2002.002352

27. Ekstrand, J., Hägglund, M., & Waldén, M. (2011). Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *The American Journal of Sports Medicine*, *39*(6), 1226–1232. https://doi.org/10.1177/0363546510395879

28. Hägglund, M., Waldén, M., & Ekstrand, J. (2013). Risk factors for lower extremity muscle injury in professional soccer: The UEFA injury study. *The American Journal of Sports Medicine, 41*(2), 277–285. https://doi.org/10.1177/0363546512470634

29. Heiderscheit, B. C., Sherry, M. A., Silder, A., Chumanov, E. S., & Thelen, D. G. (2010). Hamstring strain injuries: Recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 40*(2), 67–81. https://doi.org/10.2519/jospt.2010.3047

30. Hägglund, M., Waldén, M., Magnusson, H., Kristenson, K., Bengtsson, H., & Ekstrand, J. (2013). Injuries affect team performance negatively in professional football: An 11-year

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

follow-up of the UEFA Champions League injury study. *British Journal of Sports Medicine, 47*(12), 738–742. https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092215

31. Askling, C. M., Tengvar, M., Saartok, T., & Thorstensson, A. (2007). Acute first-time hamstring strains during high-speed running: A longitudinal study including clinical and magnetic resonance imaging findings. *American Journal of Sports Medicine, 35*(2), 197–206. https://doi.org/10.1177/0363546506294679

32. Ekstrand, J. (2013). Keeping your top players on the pitch: The key to football medicine at a professional level. *British Journal of Sports Medicine*. https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092771

33. Edouard, P., Branco, P., & Alonso, J.-M. (2016). Muscle injury is the principal injury type and hamstring muscle injury is the first injury diagnosis during top-level international athletics championships between 2007 and 2015. *British Journal of Sports Medicine, 50*(10), 619–630. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095559

34. Petersen, J., Thorborg, K., Nielsen, M. B., Budtz-Jørgensen, E., & Hölmich, P. (2011). Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: A cluster-randomized controlled trial. *The American Journal of Sports Medicine, 39*(11), 2296–2303. https://doi.org/10.1177/0363546511419277

35. Van der Horst, N., Smits, D.-W., Petersen, J., Goedhart, E. A., & Backx, F. J. G. (2015). The preventive effect of the Nordic hamstring exercise on hamstring injuries in amateur soccer players: A randomized controlled trial. *The American Journal of Sports Medicine*, *43*(6), 1316–1323. https://doi.org/10.1177/0363546515574057

36. Thorborg, K. (2012). Why hamstring eccentrics are hamstring essentials. *British Journal of Sports Medicine, 46*(7), 463–465. https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090962

37. McCall, A., Pruna, R., Van der Horst, N., Dupont, G., Buchheit, M., Coutts, A. J., Impellizzeri, F. M., Fanchini, M., & EFP-Group. (2020). Exercise-based strategies to prevent muscle injury in male elite footballers: An expert-led Delphi survey of 21 practitioners belonging to 18 teams from the Big-5 European leagues. *Sports Medicine, 50*(9), 1667–1681. https://doi.org/10.1007/s40279-020-01315-7

38. Vicens-Bordas, J., Parvaneh Sarand, A., Beato, M., & Buhmann, R. (2024). Hamstring injuries, from the clinic to the field: A narrative review discussing exercise transfer. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 19*(8), 729-737. https://doi.org/10.1123/ijspp.2024-0049

39. Kalkhoven, J. T., Lukauskis-Carvajal, M., Sides, D. L., McLean, B. D., & Watsford, M. L. (2023). A conceptual exploration of hamstring muscle-tendon functioning during the late-swing phase of sprinting: The importance of evidence-based hamstring training frameworks. *Sports Medicine, 53*(12), 2321-2346. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01904-2

40. Kalema, R. N., Schache, A. G., Williams, M. D., Heiderscheit, B., Trajano, G. S., & Shield, A. J. (2021). Sprinting biomechanics and hamstring injuries: Is there a link? A literature review. *Sports, 9*(10), 141. https://doi.org/10.3390/sports9100141

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

41. Huygaerts, S., Cos, F., Cohen, D. D., Calleja-González, J., Guitart, M., Blazevich, A. J., & Alcaraz, P. E. (2020). Mechanisms of hamstring strain injury: Interactions between fatigue, muscle activation and function. *Sports, 8*(5), 65. https://doi.org/10.3390/sports8050065

42. Wan, X., Li, S., Best, T. M., Liu, H., Li, H., & Yu, B. (2021). Effects of flexibility and strength training on peak hamstring musculotendinous strains during sprinting. *Journal of Sport and Health Science, 10*(2), 222-229. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.08.001

43. Street, S. B., & Kaminski, T. (2020). Does the FIFA 11+ program prevent hamstring injuries in college-aged male soccer players? A critically appraised topic. *Journal of Sport Rehabilitation, 30*(1), 158-160. https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0390

44. Mann, R., & Sprague, P. (1980). A kinetic analysis of the ground leg during sprint running. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *51*(2), 334–348. https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10605202

45. Mann, R. V. (1981). A kinetic analysis of sprinting. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *13*(5), 325–328.

46. Ekstrand, J., Bengtsson, H., Waldén, M., Davison, M., Khan, K. M., & Hägglund, M. (2022). Hamstring injury rates have increased during recent seasons and now constitute 24% of all injuries in men's professional football: The UEFA Elite Club Injury Study from 2001/02 to 2021/22. *British Journal of Sports Medicine*, 57(5), 292-298. https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-105407

47. Allen, T., Taberner, M., & Rhodes, D. (2023). Running more than before? The evolution of running load demands in the English Premier League. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 19(2). https://doi.org/10.1177/17479541231164507

48. Impellizzeri, F. M., McCall, A., & van Smeden, M. (2021). Why methods matter in a meta-analysis: A reappraisal showed inconclusive injury preventive effect of Nordic hamstring exercise. *Journal of Clinical Epidemiology*, 140, 111-124. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.09.007

49. Van Dyk, N., Bahr, R., Burnett, A. F., Whiteley, R., Bakken, A., Mosler, A., Farooq, A., & Witvrouw, E. (2017). A comprehensive strength testing protocol offers no clinical value in predicting risk of hamstring injury: A prospective cohort study of 413 professional football players. *British Journal of Sports Medicine*, *51*(23), 1695–1702. https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097754

50. Roe, M., Delahunt, E., McHugh, M., Gissane, C., Malone, S., Collins, K., & Blake, C. (2019). Association between eccentric knee flexor strength and hamstring injury risk in 185 elite Gaelic football players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30*(1), 135–142. https://doi.org/10.1111/sms.13588

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

51. Sherry, M. A., & Best, T. M. (2004). A comparison of 2 rehabilitation programs in the treatment of acute hamstring strains. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, *34*(3), 116–125. https://doi.org/10.2519/jospt.2004.34.3.116

52. van der Horst N, van de Hoef S, Reurink G, Huisstede B, Backx F. Return to Play After Hamstring Injuries: A Qualitative Systematic Review of Definitions and Criteria. Sports Med. juin 2016;46(6):899-912.

53. Mero, A., Komi, P. V., & Gregor, R. J. (1992). Biomechanics of sprint running: A review. *Sports Medicine, 13*(6), 376–392. https://doi.org/10.2165/00007256-199213060-00002

54. Macdonald, B., McAleer, S., Kelly, S., Chakraverty, R., Johnston, M., & Pollock, N. (2018). Hamstring rehabilitation in elite track and field athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in clinical practice. *British Journal of Sports Medicine*. https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098971

55. Kamina, P. (2007). *Anatomie clinique: Tome 1* (3e édition)*, Anatomie des membres*. Maloine.

56. Drake RL, Vogl W, Mitchell AWM. 2015. Gray's anatomie pour les étudiants.

57. Edouard P, Serra J-M, Pruvost J, Depiesse F. Les lésions musculaires des ischio-jambiers. Journal de Traumatologie du Sport. 1 sept 2013;30(3):176-84.

58. Erickson, L. N., & Sherry, M. A. (2017). Rehabilitation and return to sport after hamstring strain injury. *Journal of Sport and Health Science, 6*(3), 262–270. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2017.04.001

59. Silder, A., Sherry, M. A., Sanfilippo, J., Tuite, M. J., Hetzel, S. J., & Heiderscheit, B. C. (2013). Clinical and morphological changes following 2 rehabilitation programs for acute hamstring strain injuries: A randomized clinical trial. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 43*(5), 284–299. https://doi.org/10.2519/jospt.2013.4452

60. Chu, S. K., & Rho, M. E. (2016). Hamstring injuries in the athlete: Diagnosis, treatment, and return to play. *Current Sports Medicine Reports, 15*(3), 184–190. https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000264

61. Malliaropoulos, N., Papacostas, E., Kiritsi, O., Papalada, A., Gougoulias, N., & Maffulli, N. (2010). Posterior thigh muscle injuries in elite track and field athletes. *The American Journal of Sports Medicine, 38*(9), 1813–1819. https://doi.org/10.1177/0363546510366423

62. Bellaïche, L. (2008). Lésions musculo-aponévrotiques et tendineuses. Classification–explorations radiologiques. Journal of Traumatic Surgery, 09(04), 8. https://doi.org/10.1016/j.jts.2007.06.016

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

63. Ekstrand J, Healy JC, Waldén M, Lee JC, English B, Hägglund M. Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play. Br J Sports Med 2012;46:112–7. https://doi.org/10.1136/BJSPORTS-2011-090155

64. Crema MD, Guermazi A, Tol JL, Niu J, Hamilton B, Roemer FW. Acute hamstring injury in football players: Association between anatomical location and extent of injury-A large single-center MRI report. J Sci Med Sport 2016;19:317–22. https://doi.org/10.1016/J.JSAMS.2015.04.005

65. van der Made, A. D., Wieldraaijer, T., Kerkhoffs, G. M., Kleipool, R. P., Engebretsen, L., van Dijk, C. N., & Golanó, P. (2015). The hamstring muscle complex. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 23*(7), 2115-2122. https://doi.org/10.1007/s00167-013-2744-0

66. Vleeming, A., Schuenke, M. D., Masi, A. T., Carreiro, J. E., Danneels, L., & Willard, F. H. (2012). The sacroiliac joint: An overview of its anatomy, function, and potential clinical implications. *Journal of Anatomy, 221*(6), 537-567. https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2012.01564.x

67. Pérez-Bellmunt, A., Miguel-Pérez, M., Blasi Brugué, M., Blasi Cabús, J., Casals, M., Martinoli, C., & Kuisma, R. (2015). An anatomical and histological study of the structures surrounding the proximal attachment of the hamstring muscles. *Manual Therapy, 20*(3), 445-450. https://doi.org/10.1016/j.math.2014.11.005

68. Van Wingerden, J. P., Vleeming, A., Snijders, C. J., & Stoeckart, R. (1993). A functional-anatomical approach to the spine-pelvis mechanism: Interaction between the biceps femoris muscle and the sacrotuberous ligament. *European Spine Journal, 2*(3), 140-144. https://doi.org/10.1007/BF00301411

69. Van Wingerden, J. P., Vleeming, A., Buyruk, H. M., & Raissadat, K. (2004). Stabilization of the sacroiliac joint in vivo: Verification of muscular contribution to force closure of the pelvis. *European Spine Journal, 13*(3), 199-205. https://doi.org/10.1007/s00586-003-0575-2

70. Özyürek, S., Aktar, B., Kosova, A., Aydın, E., Türedi, R., & Özünlü Pekyavaş, N. (2024). Effect of hamstring flexibility on cervical range of motion and deep neck flexor endurance in healthy young adults: A study to explore myofascial tensegrity network. Journal of Bodywork and Movement Therapies, 40, 662-668. https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.05.025

71. Rodineau J, Durey A. Le traitement médical des lésions musculaires. JAMA Edition Fr (Actualités thérapeutiques):20–2.

72. Brasseur JL, Zeitoun-Eiss D, Bach G, . Valeur pronostique de l'échographie dans les lésions musculaires post-traumatiques. In: Actualités en échographie de l'appareil locomoteur (tome VIII). In.

73. Mueller-Wohlfahrt, H.-W., Haensel, L., Mithoefer, K., Ekstrand, J., English, B., McNally, S., Orchard, J., van Dijk, C. N., Kerkhoffs, G. M., Schamasch, P., Blottner, D., Swaerd, L.,

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Goedhart, E., & Ueblacker, P. (2013). Terminology and classification of muscle injuries in sport: The Munich consensus statement. *British Journal of Sports Medicine, 47*(6), 342–350. https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091448

74. Askling, C. M., Tengvar, M., & Thorstensson, A. (2013). Acute hamstring injuries in Swedish elite football: A prospective randomised controlled clinical trial comparing two rehabilitation protocols. *British Journal of Sports Medicine*, 47(15), 953-959. https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092165

75. Verrall, G., & Dolman, B. (2016). Deducing a mechanism of all musculoskeletal injuries. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, 6(2), 174–182. https://doi.org/10.11138/mltj/2016.6.2.174

76. De Smet, A. A., & Best, T. M. (2000). MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes. *AJR. American Journal of Roentgenology*, 174(2), 393–399. https://doi.org/10.2214/ajr.174.2.1740393

77. Schache, A. G., Dorn, T. W., Wrigley, T. V., Brown, N. A. T., & Pandy, M. G. (2013). Stretch and activation of the human biarticular hamstrings across a range of running speeds. *European Journal of Applied Physiology*, 113(11), 2813–2828. https://doi.org/10.1007/s00421-013-2713-9

78. Schuermans, J., Van Tiggelen, D., Danneels, L., & Witvrouw, E. (2014). Biceps femoris and semitendinosus—teammates or competitors? New insights into hamstring injury mechanisms in male football players: a muscle functional MRI study. *British Journal of Sports Medicine*, 48(22), 1599–1606. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094017

79. Sherry, M. A., Johnston, T. S., & Heiderscheit, B. C. (2015). Rehabilitation of acute hamstring strain injuries. *Clinics in Sports Medicine*, *34*(2), 263–284. https://doi.org/10.1016/j.csm.2014.12.009

80. Brukner, P. (2017). Rehabilitation and return to sport after hamstring strain injury. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology, 10*, 23–32. https://doi.org/10.1016/j.asmart.2017.05.001

81. Askling CM, Nilsson J, Thorstensson A. A new hamstring test to complement the common clinical examination before return to sport after injury. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. déc 2010;18(12):1798-803.

82. Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring Strain Injuries: Factors that Lead to Injury and Re-Injury. Sports Medicine. mars 2012;42(3):209-26.

83. Malliaropoulos N, Isinkaye T, Tsitas K, Maffulli N. Reinjury after acute posterior thigh muscle injuries in elite track and field athletes. Am J Sports Med. févr 2011;39(2):304-10.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

84. Verrall G, Slavotinek J, Barnes P. The effect of sports specific training on reducing the incidence of hamstring injuries in professional Australian Rules football players. Br J Sports Med. juin 2005;39(6):363-8.

85. Duhig S, Shield AJ, Opar D, Gabbett TJ, Ferguson C, Williams M. Effect of high-speed running on hamstring strain injury risk. Br J Sports Med. déc 2016;50(24):1536-40.

86. Bourne MN, Duhig SJ, Timmins RG, Williams MD, Opar DA, Al Najjar A, et al. Impact of the Nordic hamstring and hip extension exercises on hamstring architecture and morphology: implications for injury prevention. Br J Sports Med. mars 2017;51(5):469-77.

87. Rg T, Mn B, Aj S, Md W, C L, Da O. Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): a prospective cohort study. Br J Sports Med [Internet]. déc 2016 [cité 10 nov 2022];50(24). Disponible sur: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26675089/

88. Lieber RL, Fridén J. Muscle damage is not a function of muscle force but active muscle strain. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. févr 1993;74(2):520-6.

89. Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring strain injuries: factors that lead to injury and re- injury. Sports Med 2012;42:209–26. https://doi.org/10.2165/11594800-000000000-00000.

90. Liu H, Garrett WE, Moorman CT, Yu B. Injury rate, mechanism, and risk factors of hamstring strain injuries in sports: A review of the literature. Journal of Sport and Health Science 2012;1:92–101. https://doi.org/10.1016/J.JSHS.2012.07.003.

91. Green B, Bourne MN, van Dyk N, Pizzari T. Recalibrating the risk of hamstring strain injury (HSI): A 2020 systematic review and meta-analysis of risk factors for index and recurrent hamstring strain injury in sport. Br J Sports Med 2020;54:1081–8. https://doi.org/10.1136/BJSPORTS- 2019-100983.

92. Lahti, J. (2022). *A multifactorial and individualized approach to reduce hamstring muscle injuries in professional football players* (Doctoral thesis). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15039.64161

93. Opar, D. A., Williams, M. D., & Shield, A. J. (2012). Hamstring strain injuries: Factors that lead to injury and re-injury. *Sports Medicine, 42*(3), 209–226. https://doi.org/10.2165/11594800-000000000-00000

94. Freckleton, G., & Pizzari, T. (2013). Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 47*(6), 351–358. https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090664

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

95. Llurda-Almuzara, L., Labata-Lezaun, N., López-de-Celis, C., Aiguadé-Aiguadé, R., Romaní-Sánchez, S., Rodríguez-Sanz, J., Fernández-de-las-Peñas, C., & Pérez-Bellmunt, A. (2021). *Biceps femoris activation during hamstring strength exercises: A systematic review*. Sports, *9*(8), 108. https://www.mdpi.com/1660-4601/18/16/8733

96. Van Dyk, N., Bahr, R., Whiteley, R., Tol, J. L., Kumar, B. D., Hamilton, B., Farooq, A., & Witvrouw, E. (2016). Hamstring and quadriceps isokinetic strength deficits are weak risk factors for hamstring strain injuries: A 4-year cohort study. *American Journal of Sports Medicine, 44*(7), 1789-1795. https://doi.org/10.1177/0363546516632526

97. Astrella, A., Iordanov, D., De Caro, D., Jiménez-Reyes, P., & Mendiguchia, J. (2024). Biceps femoris muscle-tendon strain during an entire overground sprint acceleration: A biomechanical explanation for hamstring injuries in the acceleration phase. *Sports Biomechanics*, 1-14. https://doi.org/10.1080/14763141.2024.2353233

98. Mendiguchia, J., Garrues, M. A., Schilders, E., Myer, G. D., & Dalmau-Pastor, M. (2024). Anterior pelvic tilt increases hamstring strain and is a key factor to target for injury prevention and rehabilitation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 32*(3), 573-582. https://doi.org/10.1002/ksa.12045

99. Nurse, C. A., Lewis, C. L., & Shefelbine, S. J. (2023). Frontal plane pelvic kinematics during high velocity running: Association with hamstring injury history. *Physical Therapy in Sport, 64*, 133-139. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2023.10.002

100. Edouard, P., Lahti, J., Nagahara, R., Samozino, P., Navarro, L., Guex, K., Rossi, J., Brughelli, M., Mendiguchia, J., & Morin, J.-B. (2021). Low horizontal force production capacity during sprinting as a potential risk factor of hamstring injury in football. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(15), 7827. https://doi.org/10.3390/ijerph18157827

101. Mendiguchia, J., Martinez-Ruiz, E., Edouard, P., Morin, J.-B., Martinez-Martinez, F., Idoate, F., & Mendez-Villanueva, A. (2017). A multifactorial, criteria-based progressive algorithm for hamstring injury treatment. Medicine & Science in Sports & Exercise, 49(7), 1482-1492. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001241

102. Prince, C., Morin, J.-B., Mendiguchia, J., Lahti, J., Guex, K., Edouard, P., & Samozino, P. (2021). Sprint specificity of isolated hamstring-strengthening exercises in terms of muscle activity and force production. *Frontiers in Sports and Active Living, 2*, 609636. https://doi.org/10.3389/fspor.2020.609636

103. Higashihara, A., Mendiguchia, J., Ono, T., Nagano, Y., Sasaki, S., Mineta, S., & Hirose, N. (2022). *Neuromuscular responses of the hamstring and lumbopelvic muscles during unanticipated trunk perturbations*. *Journal of Sports Sciences, 40*(4), 431–441. https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1996986

104. Gabbe, B. J., Finch, C. F., Bennell, K. L., & Wajswelner, H. (2005). Risk factors for hamstring injuries in community level Australian football. *British Journal of Sports Medicine*, 39(2), 106-110. https://doi.org/10.1136/bjsm.2003.011197

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

105. Clark, K. P., Meng, C. R., & Stearne, D. J. (2020). "Whip from the hip": thigh angular motion, ground contact mechanics, and running speed. *Biology Open, 9*(10), bio.053546. https://doi.org/10.1242/bio.053546

106. Sides. DL. Kinematics and kinetics of maximal velocity sprinting and specificity of training in elite athletes [PhD thesis]. Salford: University of Salford; 2015.

107. Pose Method. (n.d.). *Fréquence des foulées*. Pose Method France. https://france.posemethod.com/frequence-des-foulees/

108. Kwiecien, S. Y., & McHugh, M. P. (2021). The cold truth: The role of cryotherapy in the treatment of injury and recovery from exercise. *European Journal of Applied Physiology, 121*(8), 2125-2142. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04683-8

109. Racinais, S., Dablainville, V., Rousse, Y., Ihsan, M., Grant, M.-E., Schobersberger, W., Budgett, R., & Engebretsen, L. (2024). Cryotherapy for treating soft tissue injuries in sport medicine: a critical review. *British Journal of Sports Medicine, 58*(20), 1215-1223. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108304

110. Ramos, G. V., Pinheiro, C. M., Messa, S. P., Delfino, G. B., Marqueti, R. C., Salvini, T. F., & Durigan, J. L. Q. (2016). *Cryotherapy reduces inflammatory response without altering muscle regeneration process and extracellular matrix remodeling of rat muscle.* Scientific Reports, 6, 18525. https://doi.org/10.1038/srep18525

111. Woods C, Hawkins RD, Maltby S, Hulse M, Thomas A, Hodson A. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football--analysis of hamstring injuries. Br J Sports Med 2004;38:36–41. https://doi.org/10.1136/BJSM.2002.002352

112. Mendiguchia J, Brughelli M. A return-to-sport algorithm for acute hamstring injuries. Physical Therapy in Sport. févr 2011;12(1):2-14.

113. De Vos R-J, Reurink G, Goudswaard G-J, Moen MH, Weir A, Tol JL. Clinical findings just after return to play predict hamstring re-injury, but baseline MRI findings do not. Br J Sports Med. sept 2014;48(18):1377-84.

114. Maniar N, Shield AJ, Williams MD, Timmins RG, Opar DA. Hamstring strength and flexibility after hamstring strain injury: a systematic review and meta-analysis. Br J Sports Med. août 2016;50(15):909-20.

115. Valle X, L.Tol J, Hamilton B, Rodas G, Malliaras P, Malliaropoulos N, et al. Hamstring Muscle Injuries, a Rehabilitation Protocol Purpose. Asian J Sports Med [Internet]. 1 déc 2015 [cité 31 oct 2019];6(4). Disponible sur: http://asjsm.neoscriber.org/en/articles/21628.html

116. Warren P, Gabbe BJ, Schneider-Kolsky M, Bennell KL. Clinical predictors of time to return to competition and of recurrence following hamstring strain in elite Australian footballers. Br J Sports Med. mai 2010;44(6):415-9.

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

117. Hickey JT, Timmins RG, Maniar N, Williams MD, Opar DA. Criteria for Progressing Rehabilitation and Determining Return-to-Play Clearance Following Hamstring Strain Injury: A Systematic Review. Sports Med. juill 2017;47(7):1375-87.

118. Bramah, C., Rhodes, S., Clarke-Cornwell, A., & Dos'Santos, T. (2025). Sprint running mechanics are associated with hamstring strain injury: A 6-month prospective cohort study of 126 elite male footballers. British Journal of Sports Medicine. Advance online publication. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108600

119. Bramble, D. M., & Lieberman, D. E. (2004). Endurance running and the evolution of Homo. Nature, 432(7015), 345–352. https://doi.org/10.1038/nature03052

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

ANNEXES

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Liste des annexes

Annexe I : Lignes directrices PRISMA (Gedda, 2015)

Annexe II : Équation de recherche

Annexe III : Niveau de preuves HAS (HAS, 2013)

Annexe IV : Échelle PEDro

Annexe V : Échelle SANRA

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Annexe I : Lignes directrices PRISMA (Gedda, 2015)

Tableau I. Traduction française originale de la liste de contrôle PRISMA 2009.

Section/sujet	N°	Critères de contrôle	Page N°
TITRE			
Titre	1	Identifier le rapport comme une revue systématique, une méta-analyse, ou les deux.	
RÉSUMÉ			
Résumé structuré	2	Fournir un résumé structuré incluant, si applicable : contexte ; objectifs ; sources des données ; critères d'éligibilité des études, populations, et interventions ; évaluation des études et méthodes de synthèse ; résultats ; limites ; conclusions et impacts des principaux résultats ; numéro d'enregistrement de la revue systématique.	
INTRODUCTION			
Contexte	3	Justifier la pertinence de la revue par rapport à l'état actuel des connaissances.	
Objectifs	4	Déclarer explicitement les questions traitées en se référant aux participants, interventions, comparaisons, résultats, et à la conception de l'étude (*PICOS*[a]).	
MÉTHODE			
Protocole et enregistrement	5	Indiquer si un protocole de revue de la littérature existe, s'il peut être consulté et où (par exemple, l'adresse web), et, le cas échéant, fournir des informations d'identification, y compris le numéro d'enregistrement.	
Critères d'éligibilité	6	Spécifier les caractéristiques de l'étude (par exemple, PICOS, durée de suivi) et les caractéristiques du rapport (par exemple, années considérées, langues, statuts de publication) utilisées comme critères d'éligibilité, et justifier ce choix.	
Sources d'information	7	Décrire toutes les sources d'information (par exemple : bases de données avec la période couverte, échange avec les auteurs pour identifier des études complémentaires) de recherche et la date de la dernière recherche.	
Recherche	8	Présenter la stratégie complète de recherche automatisée d'au moins une base de données, y compris les limites décidées, de sorte qu'elle puisse être reproduite.	
Sélection des études	9	Indiquer le processus de sélection des études (c.-à-d. : triage, éligibilité, inclusion dans la revue systématique, et, le cas échéant, inclusion dans la méta-analyse).	
Extraction des données	10	Décrire la méthode d'extraction de données contenues dans les rapports (par exemple : formulaires pré-établis, librement, en double lecture) et tous les processus d'obtention et de vérification des données auprès des investigateurs.	
Données	11	Lister et définir toutes les variables pour lesquelles des données ont été recherchées (par exemple : PICOS, sources de financement) et les suppositions et simplifications réalisées.	
Risque de biais inhérent à chacune des études	12	Décrire les méthodes utilisées pour évaluer le risque de biais de chaque étude (en spécifiant si celui-ci se situe au niveau de l'étude ou du résultat), et comment cette information est utilisée dans la synthèse des données.	
Quantification des résultats	13	Indiquer les principales métriques de quantification des résultats (par exemple : *risk ratio*, différence entre les moyennes).	
Synthèse des résultats	14	Décrire les méthodes de traitement des données et de combinaison des résultats des études, si effectué, y compris les tests d'hétérogénéité (par exemple : I^2) pour chaque méta-analyse.	
Risque de biais transversal aux études	15	Spécifier toute quantification du risque de biais pouvant altérer le niveau de preuve global (par exemple : biais de publication, rapport sélectif au sein des études).	
Analyses complémentaires	16	Décrire les méthodes des analyses complémentaires (par exemple : analyses de sensibilité ou en sous-groupes, méta-régression), si effectuées, en indiquant celles qui étaient prévues *a priori*.	

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Tableau I. Traduction française originale de la liste de contrôle PRISMA 2009 (suite).

Section/sujet	N°	Critères de contrôle	Page N°
RÉSULTATS			
Sélection des études	17	Indiquer le nombre d'études triées, examinées en vue de l'éligibilité, et incluses dans la revue, avec les raisons d'exclusion à chaque étape, de préférence sous forme d'un diagramme de flux.	
Caractéristiques des études sélectionnées	18	Pour chaque étude, présenter les caractéristiques pour lesquelles des données ont été extraites (par exemple : taille de l'étude, PICOS, période de suivi) et fournir les références.	
Risque de biais relatif aux études	19	Présenter les éléments sur le risque de biais de chaque étude et, si possible, toute évaluation des conséquences sur les résultats (voir item 12).	
Résultats de chaque étude	20	Pour tous les résultats considérés (positifs ou négatifs), présenter, pour chaque étude : (a) une brève synthèse des données pour chaque groupe d'intervention ; (b) les ampleurs d'effets estimés et leurs intervalles de confiance, idéalement avec un graphique en forêt (*forest plot*).	
Synthèse des résultats	21	Présenter les principaux résultats de chaque méta-analyse réalisée, incluant les intervalles de confiance et les tests d'hétérogénéité.	
Risque de biais transversal aux études	22	Présenter les résultats de l'évaluation du risque de biais transversal aux études (voir item 15).	
Analyse complémentaire	23	Le cas échéant, donner les résultats des analyses complémentaires (par exemple : analyses de sensibilité ou en sous-groupes, méta-régression [voir item 16]).	
DISCUSSION			
Synthèse des niveaux de preuve	24	Résumer les principaux résultats, ainsi que leur niveau de preuve pour chacun des principaux critères de résultat ; examiner leur pertinence selon les publics concernés (par exemple : établissements ou professionnels de santé, usagers et décideurs).	
Limites	25	Discuter des limites au niveau des études et de leurs résultats (par exemple : risque de biais), ainsi qu'au niveau de la revue (par exemple : récupération incomplète de travaux identifiés, biais de notification).	
Conclusions	26	Fournir une interprétation générale des résultats dans le contexte des autres connaissances établies, et les impacts pour de futures études.	
FINANCEMENT			
Financement	27	Indiquer les sources de financement de la revue systématique et toute autre forme d'aide (par exemple : fourniture de données) ; rôle des financeurs pour la revue systématique.	

[a]Note du traducteur : *Patient, problem or population, Intervention, Comparison, control or comparator, Outcomes, Study design*

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Annexe II : Équation de recherche

(football players OR soccer players OR sprinters OR athletics) AND (hamstring injury OR hamstring injuries OR hamstring strain OR hamstring strains) AND (Biomechanics OR biomechanical analysis) NOT (anterior cruciate ligament)

Pubmed

("football players" OR " sprinters" OR "athletics") AND ("hamstring injury" OR "hamstring injuries") AND ("biomechanics") NOT ("anterior cruciate ligament")

ScienceDirect

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Annexe III : Niveau de preuves HAS (HAS, 2013)

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
A Preuve scientifique établie	Niveau 1 - essais comparatifs randomisés de forte puissance ; - méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ; - analyse de décision fondée sur des études bien menées.
B Présomption scientifique	Niveau 2 - essais comparatifs randomisés de faible puissance ; - études comparatives non randomisées bien menées ; - études de cohortes.
C Faible niveau de preuve scientifique	Niveau 3 - études cas-témoins.
	Niveau 4 - études comparatives comportant des biais importants ; - études rétrospectives ; - séries de cas ; - études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Échelle PEDro – Français

1.	les critères d'éligibilité ont été précisés	non ❑	oui ❑	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 ❑	oui ❑	où:
3.	la répartition a respecté une assignation secrète	non ❑	oui ❑	où:
4.	les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants	non ❑	oui ❑	où:
5.	tous les sujets étaient "en aveugle"	non ❑	oui ❑	où:
6.	tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"	non ❑	oui ❑	où:
7.	tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels	non ❑	oui ❑	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 ❑	oui ❑	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 ❑	oui ❑	où:
10.	les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels	non ❑	oui ❑	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 ❑	oui ❑	où:

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI

Scale for the Assessment of Narrative Review Articles – SANRA

Please rate the quality of the narrative review article in question, using categories 0–2 on the following scale. For each aspect of quality, please choose the option which best fits your evaluation, using categories 0 and 2 freely to imply general low and high quality. These are not intended to imply the worst or best imaginable quality.

1) Justification of the article's importance for the readership

The importance is not justified. — 0
The importance is alluded to, but not explicitly justified. — 1
The importance is explicitly justified. — 2

2) Statement of concrete aims or formulation of questions

No aims or questions are formulated. — 0
Aims are formulated generally but not concretely or in terms of clear questions. — 1
One or more concrete aims or questions are formulated. — 2

3) Description of the literature search

The search strategy is not presented. — 0
The literature search is described briefly. — 1
The literature search is described in detail, including search terms and inclusion criteria. — 2

4) Referencing

Key statements are not supported by references. — 0
The referencing of key statements is inconsistent. — 1
Key statements are supported by references. — 2

5) Scientific reasoning

(e.g., incorporation of appropriate evidence, such as RCTs in clinical medicine)

The article's point is not based on appropriate arguments. — 0
Appropriate evidence is introduced selectively. — 1
Appropriate evidence is generally present. — 2

6) Appropriate presentation of data

(e.g., absolute vs relative risk; effect sizes without confidence intervals)

Data are presented inadequately. — 0
Data are often not presented in the most appropriate way. — 1
Relevant outcome data are generally presented appropriately. — 2

Sumscore

(CC BY-NC-ND 4.0) TLILI