



HAL
open science

IRM multiparamétrique des muscles ischio-jambiers

Sylvain Grange

► **To cite this version:**

Sylvain Grange. IRM multiparamétrique des muscles ischio-jambiers. Médecine humaine et pathologie. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2023. Français. NNT : 2023STET0051 . tel-04515146

HAL Id: tel-04515146

<https://theses.hal.science/tel-04515146>

Submitted on 21 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2023STET051

**THÈSE de DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ JEAN MONNET SAINT-ÉTIENNE**

Membre de l'Université de LYON

**École Doctorale N° 488
Sciences Ingénierie Santé (SIS)**

opérée au sein de
**Centre de Recherche en Acquisition et Traitement de l'Image
pour la Santé (CREATIS)
et du Laboratoire Inter-Universitaire de la Biologie et de la Motricité : EA
7424**

Soutenue publiquement le 7/12/2023, par :

Sylvain GRANGE

**IRM multiparamétrique des muscles ischio-
jambiers**

Multiparametric MRI of hamstring muscles

Devant le jury composé de :

Pialat, Jean-Baptiste, Professeur, Hospices Civiles de Lyon, Président et Rapporteur

Cyteval, Catherine, Professeur, CHU Montpellier, Rapporteur

Isner-Horobeti, Marie-Eve, Professeur, Institut Universitaire de Réadaptation, Strasbourg, Examinatrice

Croisille, Pierre, Professeur, CHU Saint-Etienne, Directeur de thèse

Edouard, Pascal, Professeur, CHU Saint-Etienne, Co-Directeur de thèse

Résumé

Les connaissances en imagerie sur les blessures musculaires ont évolué ces dernières années. Leur prise en charge diagnostique et thérapeutique reste encore très hétérogène. Notre revue de la littérature sur les données des blessures des ischio-jambiers en IRM a permis de faire le point sur les connaissances actuelles et de montrer que la description de ces blessures est encore très éparsée et mal codifiée à l'IRM. De plus, les blessures des ischio-jambiers, autrefois considérées comme une seule et même entité, tendent aujourd'hui à être distinguées séparément. Le polymorphisme de ces blessures se retrouve dès le mécanisme lésionnel, notamment sur les deux principaux types, à savoir lors d'un sprint ou lors d'un étirement du muscle. A l'IRM, les lésions sont différenciées à la fois sur le muscle touché, mais aussi sur la structure tissulaire, le volume lésionnel, la localisation proximo-distale. La mise en place de notre cohorte HAMMER (HAMstring MEchanism mRi) de suivi prospectif des blessures des ischio-jambiers nous a permis de mettre en évidence un lien entre le mécanisme lésionnel et les composantes IRM, à savoir que les lésions par mécanisme d'étirement présentent une sévérité plus importante, à la fois en termes de grade et de volume lésionnel. De plus, nous avons établi une relation entre un paramètre clinique d'évaluation simple (la douleur au moment de la blessure) et le volume lésionnel. Nous avons aussi montré que le plus faible volume lésionnel, l'âge plus bas, le sexe masculin, un plus petit indice de masse corporelle et la plus faible douleur initiale sont des facteurs de risque de récurrence. Nous avons par la suite, à partir des données de la cohorte HAMMER, établi un programme de délimitation non supervisée des muscles de la cuisse. Nous avons ainsi pu analyser la fiabilité des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour déterminer le volume musculaire, et la comparer avec ces méthodes non supervisées. L'estimation du volume musculaire mais aussi du volume lésionnel pourrait à terme être réalisée en pratique courante, et ainsi avoir une approche quantitative rapide lors d'une IRM réalisée lors d'une blessure des ischio-jambiers. L'analyse prédictive du temps de retour au sport et l'estimation du risque de récurrence nécessitent une approche multifactorielle.

Mots clés : Imagerie par Résonance Magnétique - Muscles ischio-jambiers - Blessures - Mécanisme lésionnel - Volume - Segmentations non supervisées

Abstract

Imaging knowledge of muscle injuries has evolved in recent years. Their diagnostic and therapeutic management still remains very heterogeneous. Our review of the literature on MRI data of hamstring injuries allowed us to take stock of the current knowledge and to show that the description of these injuries is still very sparse and poorly codified on MRI. In addition, hamstring injuries, once considered a single entity, now tend to be distinguished separately. The polymorphism of these injuries can be seen in the lesion mechanism, especially in the two main types, namely during a sprint or during a stretch of the muscle. On MRI, the lesions are differentiated both on the affected muscle, but also on the tissue structure, the lesion volume, the proximo-distal location. The establishment of our HAMMER (HAMstring MEchanism mRi) cohort of prospective follow-up of hamstring injuries has allowed us to demonstrate a link between the lesion mechanism and the MRI components, namely that lesions by stretch mechanism present a greater severity, both in terms of grade and lesion volume. In addition, we have a relationship between a simple clinical assessment parameter (pain at injury) and lesion volume. We also showed that lower lesion volume, lower age, male gender, lower coporate mass index and lower initial pain are risk factors for recurrence. We subsequently established an automatic thigh muscle delineation program using data from the HAMMER cohort. We were thus able to analyze the reliability of the different methods used in the literature to determine muscle volume, and to compare them with these automated methods. The estimation of the muscle volume but also of the lesion volume could eventually be realized in current practice, and thus have a quick quantitative approach during an MRI performed during a hamstring injury. The predictive analysis of the time to return to sport and the estimation of the risk of recurrence requires a multifactorial approach.

Keywords : Magnetic Resonance Imaging - Hamstring muscles - Injuries - Clinical mechanism - Volume - Non supervised segmentations

Remerciements

A Mr Le Professeur Pierre Croisille et Mr Le Professeur Pascal Edouard. Merci de m'avoir encadré pour ce travail de thèse et pour la confiance que vous m'accordez au quotidien. Merci pour cette passion communicative pour la recherche. Soyez convaincu de mon plus profond respect.

A Mme le Professeur Catherine Cyteval, merci me faire l'honneur d'avoir accepté de juger mon travail. Merci pour la confiance que vous m'accordez à la Société Française d'Imagerie Musculo-Squelettique. Soyez convaincu de mon plus profond respect.

A Mr Le Professeur Jean-Baptiste Pialat, merci me faire l'honneur d'avoir accepté de juger mon travail. Merci de me faire partager votre précieux savoir en imagerie ostéo-articulaire. Soyez convaincu de mon plus profond respect.

A Mme le Professeur Marie-Eve Isner-Horobeti, je suis très reconnaissant du temps que vous consacrez à juger mon travail. Soyez convaincu de mon plus profond respect.

Je voudrais remercier chaleureusement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce travail de thèse et qui m'ont soutenu pendant ces 6 années ; ils se reconnaîtront...

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures et tableaux	xi
Abréviations	xiii
Chapitre I-Introduction générale.....	1
Chapitre II-Les muscles ischio-jambiers et leur exploration en imagerie	3
A - Anatomie et Pathologie des muscles ischio-jambiers	3
1- Structure et fonction du muscle strié squelettique	3
2- Anatomie des muscles ischio-jambiers	5
a - Anatomie des muscles ischio-jambiers	5
b - Fonction des muscles ischio-jambiers.....	11
B - Lésions des muscles ischio-jambiers	13
1- Epidémiologie et facteurs de risque.....	13
2- Classifications des lésions musculaires des ischio-jambiers.....	15
3- Mécanisme lésionnel.....	17
4- Diagnostic	19
5- Prise en charge thérapeutique initiale	21
6- Reprise du sport et risque de récurrence.....	21
7- Prévention	23
C - Exploration par Imagerie.....	28
1- Intérêt de l'imagerie dans le diagnostic des lésions musculaires des ischio-jambiers	28
2- Echographie : modalités et exploration	29
a - Echographie : principes généraux	29
b - Exploration des ischio-jambiers par échographie	31
3- Radiographie et Scanner : modalités et exploration.....	34
a - Radiographie : principes généraux	34
b - Scanner : principes généraux	34
c - Exploration des ischio-jambiers par radiographie et scanner	35
4- Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)	36
a - IRM : principes généraux.....	36
b - Exploration des ischio-jambiers par IRM.....	40
5- Choix entre échographie et IRM pour l'exploration des ischio-jambiers.....	42

6-	Classifications IRM des lésions des muscles ischio-jambiers	43
7-	IRM et Intelligence Artificielle	45
D -	Données actuelles de la littérature sur les lésions des ischio-jambiers en IRM	47
1-	Introduction.....	47
2-	Intérêt de l'IRM dans l'évaluation pronostique des lésions des ischio-jambiers.....	47
3-	Hétérogénéité de la littérature	50
4-	Plusieurs lésions des muscles ischio-jambiers.....	50
5-	Conclusion	51
E -	Mesures d'évaluation de la qualité des segmentations musculaires	53
1-	Dice coefficient.....	53
2-	HD : Hausdorff Distance	53
3-	AHD/MAD : Average Hausdorff Distance / Mean Absolute Distance	54
4-	Volume Similarity	54
5-	Volume musculaire global et par chef musculaire.....	55
F -	Méthodes non supervisées et d'espacement des coupes	56
1-	Méthodes non supervisées	56
a-	Présentation générale	56
b-	Approche de segmentation Multi-Atlas	56
c-	Méthode d'apprentissage profond ou Deep Learning.....	58
2-	Espacement des coupes : méthodes et problématiques	60
Chapitre III-	Problématique, hypothèses et objectifs	62
A -	Problématique	62
B -	Hypothèse	62
C -	Objectifs	63
Chapitre IV-	Contribution personnelle sur l'exploration IRM des ischio-jambiers	65
A -	Introduction	65
B -	Revue de la littérature sur la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM.....	66
1-	Résumé.....	66
2-	Article de revue de la littérature sur la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM 68	
3-	Discussion	115
C -	Cohorte HAMMER : objectifs et mise en place	117
1-	Objectifs.....	117
2-	Mise en place de la cohorte	117
D -	Lien entre la douleur et les données IRM	120
1-	Objectifs.....	120

2-	Article « HAMMER PAIN »	121
3-	Discussion	151
E -	Lien entre le mécanisme de la blessure et les données IRM	152
1-	Objectifs.....	152
2-	Article « HAMMER HAMMER »	153
3-	Discussion	187
F -	Lien entre la lésion et le risque de récurrence « POST-HAMMER ».....	188
1-	Objectifs.....	188
2-	Article « POST-HAMMER »	189
3-	Discussion	222
G -	Segmentation musculaire	224
1-	Extraction des données IRM.....	224
2-	Logiciels et outils à disposition.....	224
3-	Particularités des délimitations musculaires : difficultés et moyens de s'en affranchir	227
H -	Etude de la variabilité des segmentations inter-observateur et de leur distribution spatiale..	233
I -	Signature morphologique et sélection des atlas.....	241
J -	Méthodes non supervisées de segmentation musculaire des ischio-jambiers.	244
1-	Correction des algorithmes et réentraînement à partir de la cohorte MUST.....	244
2-	Application des algorithmes sur la cohorte HAMMER.....	246
K -	Erreurs spatiales des méthodes non supervisées et d'espacement des coupes avec interpolation	248
L -	Fiabilité de l'estimation du volume musculaire : évaluation des méthodes d'espacement des coupes avec et sans interpolation et des méthodes non supervisées.....	253
1-	Introduction.....	253
2-	Estimation du volume musculaire par les méthodes d'espacement des coupes	254
a-	Introduction.....	254
b-	Article	256
c-	Discussion	310
3-	Estimation du volume musculaire par les méthodes non supervisées	310
a-	Introduction.....	310
b-	Matériel et méthodes.....	311
c-	Résultats	312
d-	Discussion	314
e-	Conclusion	315
4-	Discussion	316
V-	Discussion générale	320

A - Résumé des principaux résultats	320
B - Explications et interprétations des principaux résultats.....	321
C - Limites	323
D - Perspectives	324
VI-Conclusion générale.....	328
Références bibliographiques	330
Annexes	351
Publications en rapport avec le travail de thèse	358
Communications en rapport avec le travail de thèse	360
Résumé.....	362

Liste des figures et tableaux

Dans cette liste, seuls sont répertoriés les figures et tableaux non intégrés dans un des articles originaux. Les figures et tableaux d'un article original sont intégrés et classés de manière indépendante au sein de cet article.

Figure 1. Schéma représentant la structure du muscle squelettique.	4
Figure 2. Anatomie des ischio-jambiers	5
Figure 3. Muscles ischio-jambiers après dissection anatomique.	7
Figure 4. Anatomie des muscles ischio-jambiers à l'IRM.	8
Figure 5. Schéma simplifié de l'anatomie du complexe tendino-musculaire.	16
Figure 6. Photographie d'une blessure des ischio-jambiers.	20
Figure 7. Photographie d'un exemple de rééducation des muscles ischio-jambiers : le Nordic Hamstring Exercice (NHE).	24
Figure 8. Exploration échographique d'une lésion des ischio-jambiers au tiers distal de la cuisse gauche.	32
Figure 9. IRM lors d'une blessure des ischio-jambiers.	41
Figure 10. Description de la British Athletic Muscle Injury Classification (BAMIC).	44
Figure 11. Diagnostic différentiel d'une blessure des ischio-jambiers.	48
Figure 12. Représentation of AI.	59
Figure 13. Segmentation des ischio-jambiers sur Logiciel 3D Slicer®.	225
Figure 14. Segmentation du chef droit antérieur du quadriceps fémoral sur le Logiciel Horos®.	226
Figure 15. Exemple de tablette graphique Wacom® INTUOS S utilisée dans notre étude.	227
Figure 16. Exemple de représentation tridimensionnelle d'un quadriceps, à partir de segmentations complètes de chaque chef.	228
Figure 17. Segmentation complète de chaque chef des ischio-jambiers sur l'ensemble du volume.	229
Figure 18. Exemple de représentation en coupe axiale d'une segmentation non supervisée des ischio-jambiers de la cuisse gauche.	230
Figure 19. Délimitation de deux quadriceps et ischio-jambiers.	231
Figure 20. Exemple d'extraction de segmentation d'une coupe de quadriceps gauche.	232
Figure 21. Zones de discordance inter-observateurs sur une segmentation du quadriceps chef par chef.	234
Figure 22. Représentation du DICE entre les segmentations des deux experts, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.	235
Figure 23. Représentation de la VS entre les deux experts, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.	236
Figure 24. Représentation du DICE entre les deux experts, sur chaque chef musculaire, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.	238
Figure 25. Représentation de la HD (Hausdorff Distance) entre les deux experts.	240
Figure 26. Représentation de 3 sujets de morphologie différente.	241
Figure 27. Exemple de représentation des caractéristiques morphologiques.	242
Figure 28. Segmentations élaborées à partir d'espacement des coupes et interpolation, pour le même sujet.	248
Figure 29. Représentation multiplanaire et tridimensionnelle des muscles ischio-jambiers.	249

Figure 30. Représentation des segmentations élaborées pour un même sujet sur le muscle semi-membraneux.....	251
Figure 31. Représentation de la coupe centrale des ischio-jambiers d'un patient de la cohorte HAMMER.....	252
Tableau 1. Volume musculaire quadricipital global pour les 7 patients de la cohorte MUST.....	313

Abréviations

AHD/MAD : Average Hausdorff Distance / Mean Absolute Distance

BAMIC : British Athletics Muscle Injury Classification

BF : Biceps Fémoral

BFCC : Biceps Fémoral Chef Court

BFCL : Biceps Fémoral Chef Long

CL : Correction by automatic Learning

DICOM : Digital Imaging and COmmunications in Medicine

DSC : Dice Similarity Coefficient

EN : Echelle Numérique

HAMMER : HAMstring MEchanics and MRi

HD : Hausdorff Distance

IJ : Ischio-Jambiers

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

IT : Tendon Intra-musculaire

JLF : Joint Label Fusion

JMA : Jonction myo-aponévrotique

JMT : Jonction myo-tendineuse

NHE : Nordic Hamstring Exercise

PACS : Picture Archiving and Communication System

QF : Quadriceps Femoris

RTP : Retour au sport (Return To Play)

RF : RadioFréquence

RF : Rectus Femoris

SM : Semi-Membraneux

ST : Semi-Tendineux

TE : Temps d'Echo

TR : Temps de Relaxation

VI : Vastus Intermedius

VL : Vastus Lateralis

VM : Vastus Medialis

VS : Volume Similarity

Chapitre I-Introduction générale

La lésion des muscles ischio-jambiers est une lésion très fréquente en sports, notamment dans les sports incluant des accélérations et des sprints (Edouard et al. 2021; Ekstrand et al. 2022; Maniar et al. 2023). Elle représente un problème de premier plan en médecine du sport. En effet, ces lésions sont responsables d'un arrêt sportif pénalisant pour l'athlète et même son équipe dans les sports collectifs (Gouttebarga et al. 2016), et exposent ensuite à un risque important de récurrence (Malliaropoulos et al. 2011).

De nombreux travaux de recherche ont exploré ces lésions sous divers angles (clinique, imagerie...) (Arnason et al. 2008; Askling et al. 2008; Pomeranz et Heidt 1993). Pourtant, leur fréquence n'a non seulement pas diminué, mais a même augmentée ces dernières années (Ekstrand et al. 2021; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). Même si la connaissance de ces lésions a évolué au fil du temps, l'évaluation du pronostic, en termes de délai de retour au sport et de risque de récurrence, ainsi que de la rééducation, reste toujours sujet à de nombreuses discussions (van Heumen et al. 2017; Pedret 2021; Rubin 2012). L'intérêt de l'imagerie dans la prise en charge de ces lésions fait aussi l'objet de nombreux débats que ce soit au moment du diagnostic initial (Reurink, Whiteley, et Tol 2015), du pronostic ou du suivi (van der Made et al. 2018). Ainsi, de nombreux travaux ont exploré l'intérêt de la réalisation d'une échographie ou d'une Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), à la fois pour le diagnostic et pour l'évaluation du pronostic, notamment pour l'évaluation du délai de retour au sport et du risque de récurrence (Crema et al. 2018; van der Made et al. 2018; Reurink, Whiteley, et Tol 2015). Toutefois, de nombreuses questions persistent : le diagnostic étant essentiellement clinique, faut-il réaliser une IRM de manière systématique lors d'une lésion des ischio-jambiers ? Y a-t-il des cas où la réalisation d'une imagerie ne paraît pas obligatoire pour réaliser le diagnostic, ou d'autres, au contraire, où sa réalisation est nécessaire ? On peut ainsi facilement imaginer, comme dans d'autres pathologies, l'association de critères cliniques faisant réaliser ou non une IRM lors d'une lésion des ischio-jambiers. Y a-t-il un lien entre les caractéristiques cliniques (douleurs, mécanisme lésionnel...) au moment de la lésion et les caractéristiques IRM ? Existe-t-il plusieurs sous-entités au sein des lésions des ischio-jambiers ? Cela permettrait de mieux appréhender les lésions des ischio-jambiers comme des lésions

bien singulières et non comme une seule et même entité. « La » lésion des ischio-jambiers pourrait être individualisée comme plusieurs lésions distinctes, ce qui reste encore à bien préciser. Ce postulat a entraîné un regain d'intérêt dans l'évaluation, le pronostic, ainsi que de la prise en charge rééducative de ces lésions. Y a-t-il un lien entre les données IRM et le risque de récurrence ? Cela pourrait donner des arguments importants sur la valeur pronostique d'une IRM sur le risque de récurrence et ainsi avoir un impact sur la prévention des récurrences.

Parallèlement, l'arrivée de « l'Intelligence Artificielle », permet de percevoir un nouveau champ d'action : le développement des segmentations non supervisées laisse entrevoir la possibilité, à terme, de pouvoir bénéficier en pratique courante de l'analyse quantitative non supervisée du volume musculaire (Le Troter et al. 2016). Bénéficier de ces données facilement permettrait de pouvoir poursuivre l'exploration de la recherche sur les lésions ischio-jambiers, l'exploration du volume musculaire mais aussi du volume de muscle lésé pourrait permettre d'améliorer le pronostic des lésions et le suivi de la rééducation.

Ainsi, dans ce manuscrit de thèse, après cette introduction (chapitre 1), nous aborderons l'anatomie des muscles ischio-jambiers et détaillerons la connaissance actuelle sur l'épidémiologie, le mécanisme lésionnel et le diagnostic de ces lésions ainsi que leurs explorations en imagerie, et notamment en IRM (chapitre II). Ensuite, nous définirons la problématique, l'hypothèse et les objectifs de ce travail de thèse d'université (chapitre III).

Il sera ensuite présenté les résultats d'une revue exhaustive de la littérature sur ces lésions des muscles ischio-jambiers. Nous rapporterons ensuite des résultats expérimentaux d'un suivi de cohorte prospective multicentrique des lésions musculaires des ischio-jambiers associé à un questionnaire sur les données cliniques de la lésion réalisé dans un délai court après la lésion. Ensuite, sera détaillé le développement et l'utilisation de techniques non supervisées, qui permettent de segmenter les muscles quadriceps et ischio-jambiers sans supervision, et aborderons aussi les méthodes de segmentation par espacement des coupes avec ou sans interpolation, techniques largement utilisées dans la littérature, notamment pour l'évaluation du volume lésionnel (Chapitre IV).

Enfin, nous ferons une synthèse, une discussion et une ouverture de ces différents travaux (chapitre V) avant de conclure sur ce travail de thèse (chapitre VI).

Chapitre II-Les muscles ischio-jambiers et leur exploration en imagerie

A - Anatomie et Pathologie des muscles ischio-jambiers

1- Structure et fonction du muscle strié squelettique

Le muscle strié squelettique, muscle à contraction volontaire, a une importance capitale dans le corps humain, car il assure la stabilité et la mobilité de celui-ci. Le muscle est fixé au squelette par l'intermédiaire du tendon, ce qui permet le mouvement dans une direction bien définie, ou la stabilisation des segments osseux.

Le muscle strié squelettique est composé de différentes couches (Figure 1). L'unité de base est la fibre musculaire (cellule musculaire). Celles-ci s'associent pour former des faisceaux de fibres, qui elles-mêmes s'associent pour former le muscle. Pour chaque couche de tissu musculaire, le muscle squelettique est entouré de tissu conjonctif, appelé endomysium (autour de chaque fibres musculaires), le périmysium (autour de chaque faisceau de fibre musculaire) et enfin l'épimysium (enveloppant le muscle), aussi appelé « aponévrose d'enveloppe ». Cette aponévrose qui entoure le muscle est une structure fibreuse riche en eau, en collagène, en fibres élastiques et en protéines conjonctives. Son rôle consiste à protéger les muscles qu'il entoure, en leur conférant une résistance à la compression et à l'étirement. L'aponévrose est définie comme une membrane constituée de fibres conjonctives denses qui enveloppe un muscle (aponévrose de revêtement), qui sert de moyen d'insertion pour un muscle plat (aponévrose d'insertion), ou qui contribue à la constitution d'une cloison entre deux muscles contigus (cloison intermusculaire), ou qui forme une séparation entre certains plans musculaires (fascia) (Fukunaga et al. 1997).

Les fibres musculaires sont composées de myofibrilles donnant un aspect strié par sa succession de sarcomères et sont responsables du caractère contractile du muscle, et donc de la production de force.

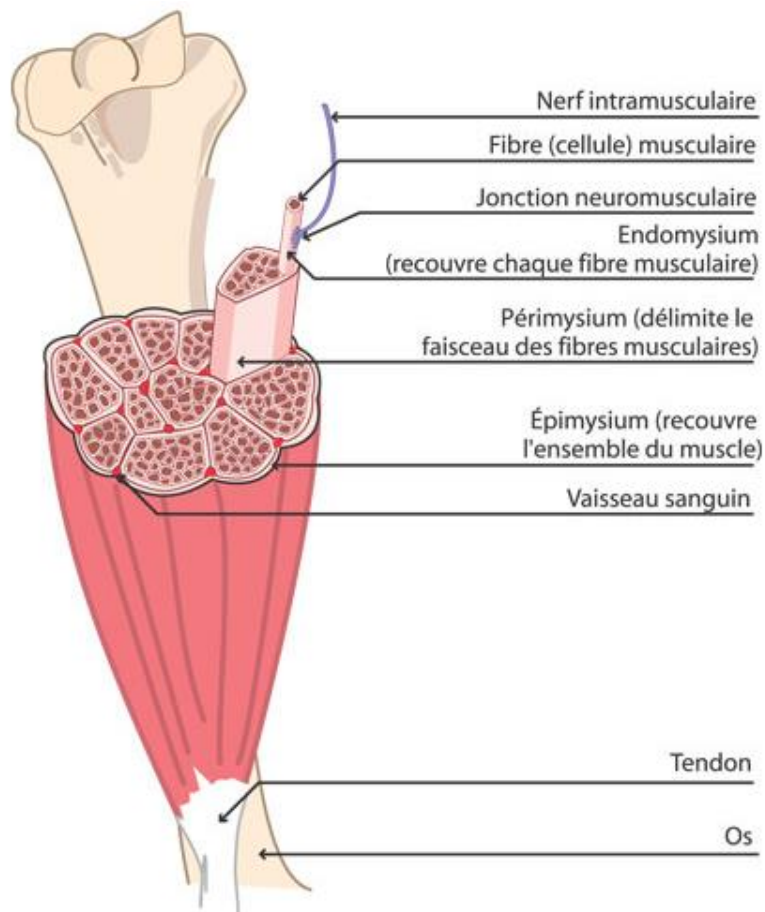


Figure 1. Schéma représentant la structure du muscle squelettique.

Institut de myologie (institut-myologie.org).

Le muscle squelettique assure, sous le contrôle du système nerveux, la motricité (locomotion, maintien et changement de posture). Ce système musculaire strié squelettique, associé au squelette et au complexe tendino-ligamentaire, constitue l'appareil locomoteur. Les propriétés du muscle sont son excitabilité, son élasticité, sa tonicité et sa contractilité. L'excitabilité correspond à la capacité à réagir à un ordre ou une stimulation. L'élasticité correspond à la déformation et l'allongement, puis à la reprise de la forme initiale. La tonicité à l'état de force au repos ou en activité. Enfin, la contractilité à la capacité à se raccourcir et reprendre sa position initiale.

2- Anatomie des muscles ischio-jambiers

a - Anatomie des muscles ischio-jambiers

Les muscles ischio-jambiers sont situés dans la partie postérieure de la cuisse et sont composés de 3 muscles (Figure 2) : le muscle semi-tendineux (ST), le muscle semi-membraneux (SM), et le biceps fémoral (BF), qui lui-même est composé de 2 chefs musculaires : le chef long du muscle biceps fémoral (BFCL), le chef court du muscle biceps fémoral (BFCC). Ces 4 chefs musculaires diffèrent par leur anatomie, leur structure et leurs propriétés (Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012; Stępień et al. 2019).

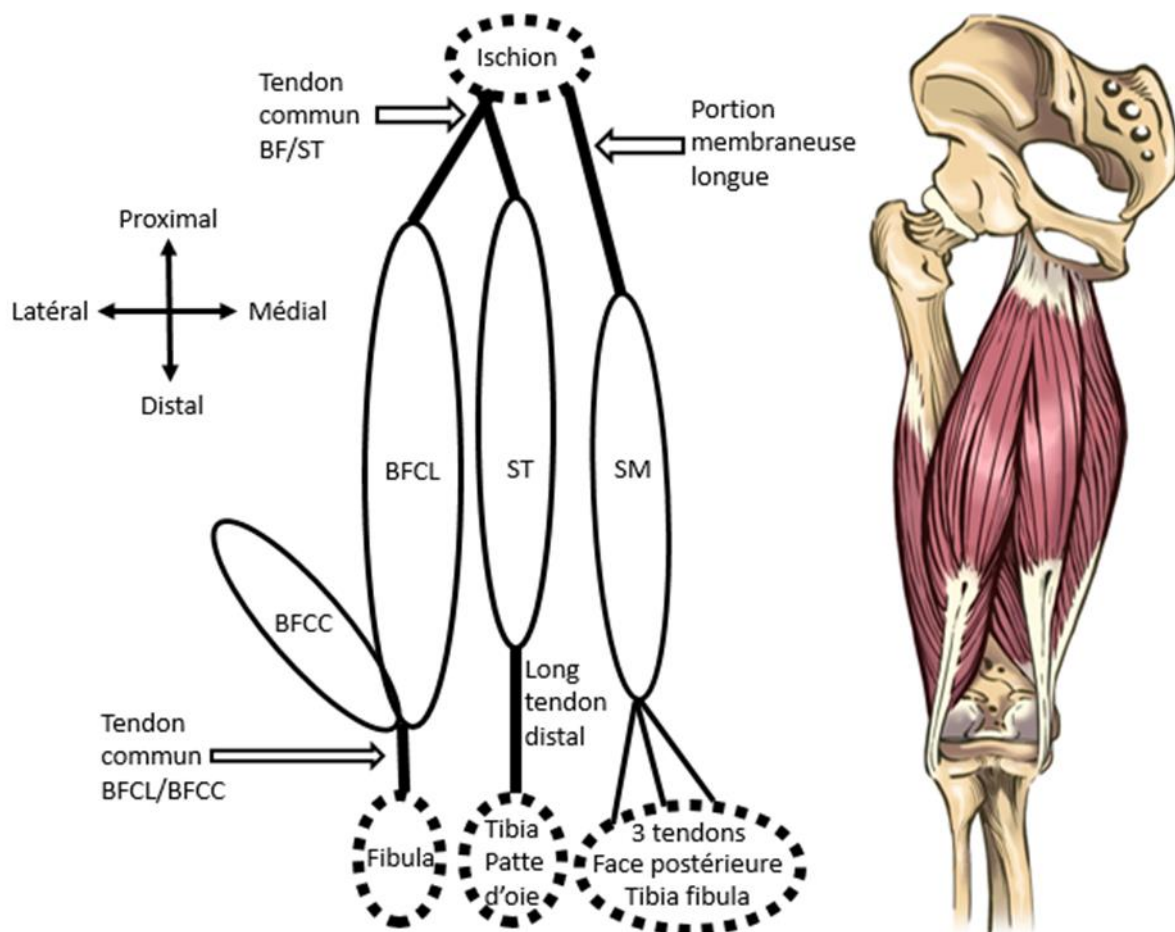


Figure 2. Anatomie des ischio-jambiers

Schéma simplifié (gauche) et dessin (droite).

L'insertion haute des ischio-jambiers est située sur la tubérosité ischiatique, sauf pour le BFCC qui s'insère sur la moitié inférieure de la lèvre latérale de la ligne âpre, située sur la face postérieure du fémur, à mi-hauteur environ de la diaphyse fémorale.

Le SM s'insère sur la face postérieure de la tubérosité ischiatique, en dehors du tendon conjoint ST/BFCL. Comme son nom l'indique, il présente une longue lame aponévrotique proximale, qui descend jusqu'au milieu de la cuisse, avec l'apparition progressive d'un corps musculaire. Sa trajectoire est médiale. Son insertion distale est complexe, il se termine par trois tendons : un tendon direct qui s'insère sur la face postérieure de la tubérosité interne du tibia, un tendon réfléchi qui contourne la tubérosité interne et s'insère à la partie antérieure de la gouttière sous-glénoïdienne, et enfin un tendon récurrent qui s'insère sur la coque condylienne externe (fabella, os accessoire situé en arrière du condyle externe) et la fibula, formant le ligament poplité oblique.

Le ST s'insère en proximal sur le tendon commun avec le BFCL au niveau de la face postérieure de la tubérosité ischiatique, en dedans de l'insertion du SM. Il est d'aspect fusiforme. Sa trajectoire est médiale (comme le SM). Il est situé à la face postérieure de la cuisse. A sa partie haute il est situé entre le BFCL (en dehors) et le SM (en dedans), puis se dirige progressivement en arrière du SM, où il devient de moins en moins musculaire et de plus en plus tendineux, pour ne devenir qu'entièrement tendineux (d'où son nom) au tiers inférieur de la cuisse. Ce tendon s'insère au sein de la « patte d'oie », sur la face antéro-interne de la partie supérieure du tibia, en dessous du muscle gracile et en arrière du muscle sartorius.

Concernant le BF, le chef long s'insère en proximal sur le tendon commun avec le ST au niveau de la partie médiale de la face postérieure de la tubérosité ischiatique, puis chemine sur la partie postéro-latérale de la cuisse, avec une trajectoire latérale. Dans la moitié distale, le chef court va naître et cheminer en avant du chef long. Le BFCC a une forme trapézoïdale inclinée. Progressivement, le corps musculaire du chef long diminue en s'insérant sur le tendon commun. Ce tendon commun du BF va s'insérer essentiellement sur le versant antéro-externe de la tête de la fibula, mais aussi par une expansion vers l'aponévrose jambière, sur la tubérosité externe du tibia et sur le ligament poplité arqué.

Cette anatomie est retrouvée sur les travaux de dissections (Figure 3), mais aussi à l'IRM (Figure 4).

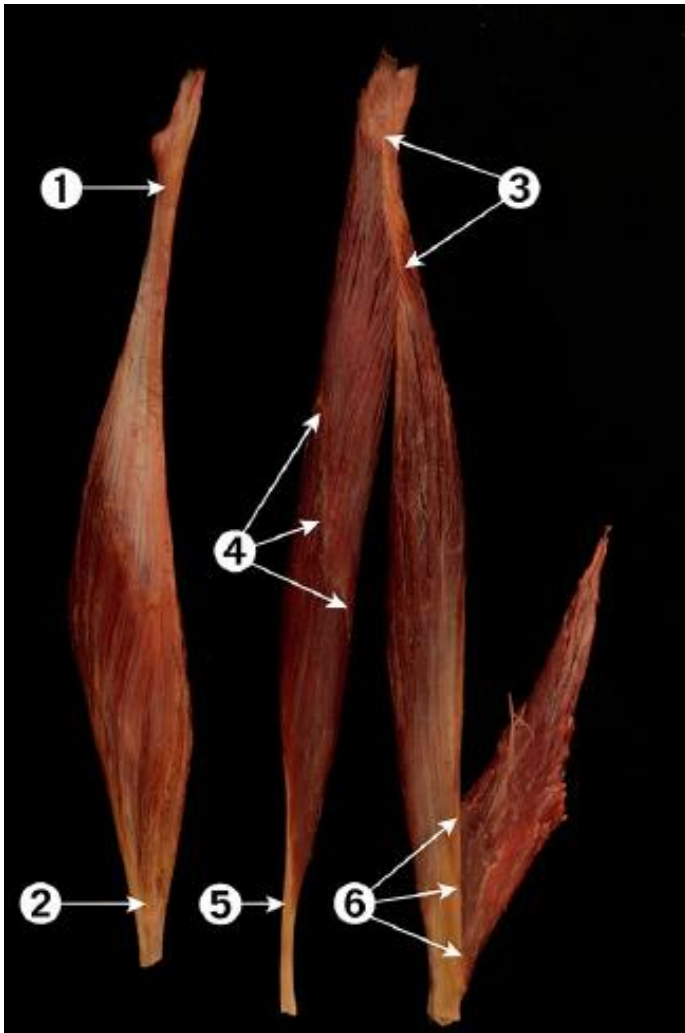


Figure 3. Muscles ischio-jambiers après dissection anatomique.

(Stępień et al. 2019). Sont représentés les attaches proximale (1) et distale (2) du SM, le tendon conjoint BFCL/ST (3), l'insertion musculaire du ST sur son aponévrose (4), le tendon distal du ST (5), et le tendon commun distal du BF (6).

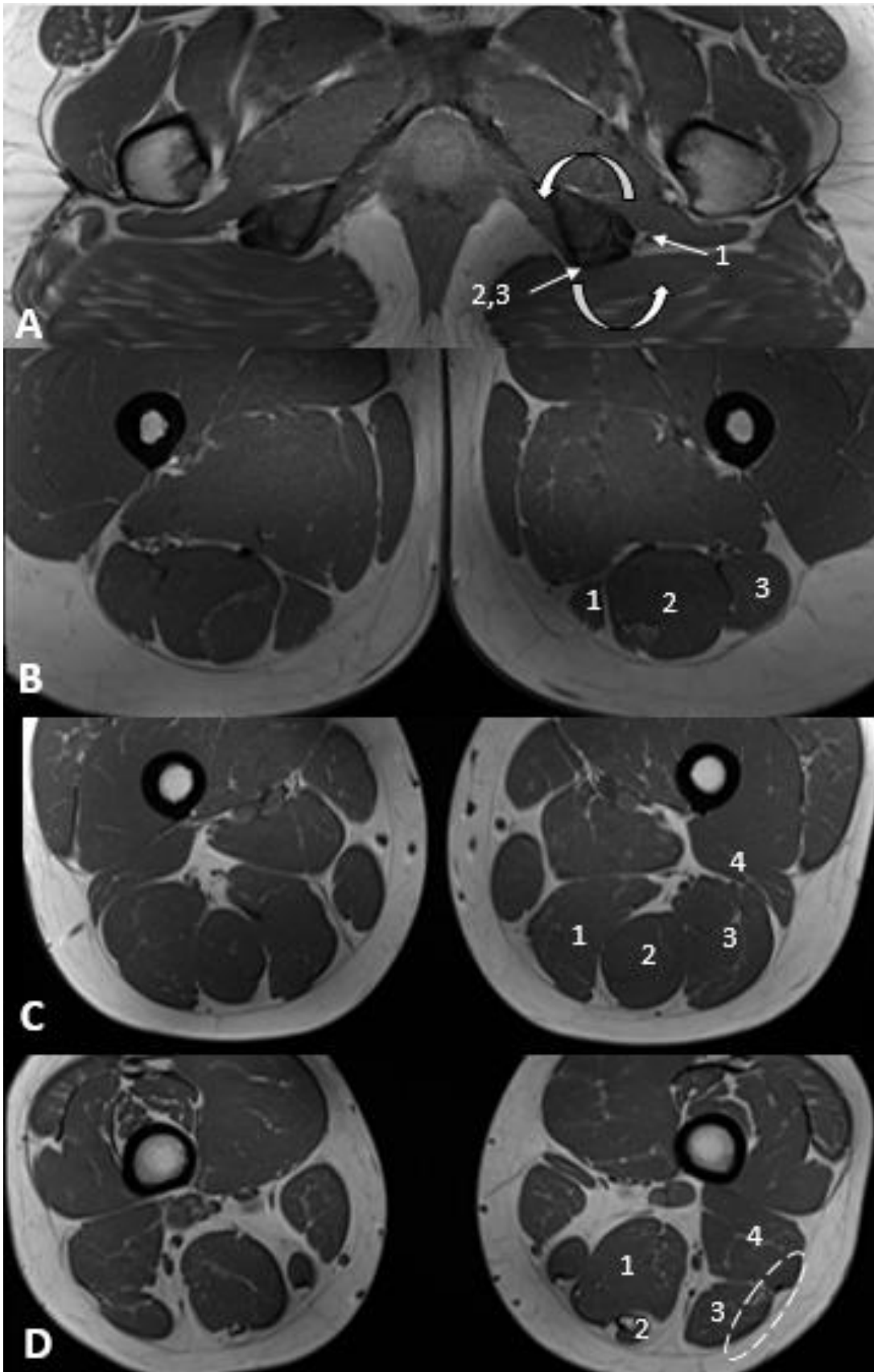


Figure 4. Anatomie des muscles ischio-jambiers à l'IRM.

IRM en séquence T1, en coupe axiale. Les 4 images sont présentées de proximal à distal, de haut en bas (A à D). Les muscles ischio-jambiers sont composés de 3 muscles dont un avec deux chefs : le semi-membraneux (SM, 1), le semi-tendineux (ST,2), le chef long du biceps fémoral (BFCL, 3), et le chef court du biceps fémoral (BFCL, 4). Image A, insertion proximale : sur la tubérosité ischiatique, naissent les 3 muscles, à savoir le SM dans la portion antéro-latérale, et le tendon conjoint ST/BFCL dans la partie postéro-médiale. Le développement tendineux et la naissance musculaire se font en dedans pour le SM, et en dehors pour le ST et surtout pour le BFCL (cf flèches rotatives). Image B, tiers proximal : le corps musculaire du ST s'est déjà bien développé, alors que celui du BFCL est encore très tendineux. Le corps du SM, quant à lui, est à peine visible, le SM restant quasiment complètement « membraneux » sur la moitié proximale. Image C, tiers central. Les 4 chefs sont visibles et tous charnus, le BFCC vient de prendre naissance en avant des autres chefs, au niveau de la ligne âpre du fémur. Image D, tiers distal. A ce niveau, le ST est uniquement tendineux, comme dans l'intégralité de son tiers distal. Il se dirige progressivement en arrière et en dedans du SM, et forme « la cerise sur le gâteau », le gâteau représentant le SM qui est encore très charnu. En dehors, le corps musculaire du BFCL diminue progressivement de taille, s'insérant sur le tendon distal commun (cercle en pointillé) alors que le corps musculaire du BFCC continue d'augmenter, donnant l'impression que le chef court « absorbe » le chef long.

Concernant la taille des muscles et de leurs fibres musculaires, les différents muscles ischio-jambiers sont assez dissemblables. Il a été étudié sur cadavre (Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012) la longueur totale du muscle et la longueur des fibres musculaires. Il est intéressant de noter que la longueur totale du muscle est relativement identique entre le BFCL, le ST et le SM (respectivement 392, 383 et 382 mm), alors qu'elle est beaucoup plus courte pour le BFCC (151 mm), ce qui est bien expliqué par le fait que le BFCC ne naît qu'à partir du milieu de la cuisse. Par contre, la longueur des fibres est très variable entre chacun des muscles, avec des fibres assez courtes pour le SM et le BFCL (respectivement 63 et 74 mm) et plus longue pour le BFCC et le ST (respectivement 131 et 178 mm). Ainsi, les ratio longueur des fibres sur longueur du muscle sont très variables, allant de 0,17 et 0,19 pour respectivement le SM et le BFCL, à 0,47 pour le ST et 0,87 pour le BFCC.

Il est important de noter que le SM et le BFCL sont des muscles hémi-pennés, alors que le BFCC est un muscle de forme trapézoïdale et que le ST est fusiforme. On rappelle que l'angle de pennation est l'angle que forme les fibres musculaires par rapport à l'axe de traction de l'aponévrose sur laquelle elles s'insèrent. Les muscles fusiformes ont des fibres relativement parallèles à l'axe principal du muscle. Cela permet un raccourcissement d'environ 50 % et une grande vitesse de contraction. Les insertions musculaires sont généralement disposées de sorte à rendre possible un grand déplacement suite à la contraction de ces muscles. Inversement, les muscles penniformes (« muscles ressemblant à une plume ») possèdent des

fibres formant un angle variable avec l'axe principal du muscle (angle de pennation). Les fibres sont disposées en 2 rangées, qui s'unissent au sein d'une ligne moyenne en faisant deux à deux des angles plus ou moins ouverts. Contrairement aux muscles fusiformes, les muscles penniformes ne sont pas capables de se raccourcir de façon importante : seulement 25% environ. La différence de force avec les muscles fusiformes vient de l'orientation oblique des fibres musculaires par rapport à l'axe du muscle. Pour une même section transversale de muscle, plus de fibres sont présentes dans un muscle penniforme que dans un muscle fusiforme, permettant ainsi le développement d'une plus grande force de contraction. Plus l'angle de pennation est important et plus le muscle sera fort. En revanche il sera capable d'un moindre raccourcissement.

Le même travail de dissection (Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012) a montré que lorsque l'articulation du genou était fléchie, le rapport de la longueur des fibres sur la longueur totale du muscle était 2 ou 3 fois plus grand pour le BFCL et le SM que dans le BFCC et le ST. Il est donc déduit que le BFCL et le SM ont une tension musculaire très importante lors de l'extension de l'articulation du genou par rapport aux 2 autres muscles, car leurs fibres musculaires sont allongées de façon excessive dans cette position. Cela pourrait expliquer la forte incidence des lésions des ischio-jambiers sur le BFCL et le SM.

Comme tout muscle strié squelettique, les muscles ischio-jambiers sont composés de différents tissus (tendon, muscle, jonction myotendineuse, aponévrose, jonction myoaponévrotique) dont la résistance à la rupture varie (Beltran et al. 2012b). De plus, les muscles ischio-jambiers présentent une raideur importante du fait de leur organisation (angle de pennation faible) et de leur forte proportion en tissu conjonctif (notamment sur le SM et le ST).

Par ailleurs, l'innervation des muscles ischio-jambiers dépend des branches du nerf sciatique, avec des racines provenant de L4 à S3. Le BFCC est innervé par la division fibulaire, alors que les autres sont innervés par les divisions tibiales. Le ST est innervé par deux branches motrices alors que les autres sont innervés par une seule. La localisation de l'entrée de ces différentes branches nerveuses motrices par rapport avec l'ischion varie selon les sujets (Stępień et al. 2019).

Leur vascularisation est assurée par des branches perforantes de l'artère fémorale profonde, ainsi que des branches de l'artère poplitée et de l'artère glutéale.

b - Fonction des muscles ischio-jambiers

Les muscles ischio-jambiers jouent un rôle majeur dans la stabilité et la motricité du corps, en influençant directement la fonction du membre inférieur (flexion et rotation interne et externe du genou) et en soutenant une posture corporelle droite (extension de hanche). La particularité des muscles ischio-jambiers réside dans le fait que leur fonction peut être considérée à la fois comme un travail synergique global (fonction commune de fléchisseur de genou), mais aussi de manière individuelle comme chaque muscle. Ainsi, d'un point de vue global, les muscles ischio-jambiers sont bi-articulaires, à savoir extenseurs de la hanche et fléchisseurs du genou, à l'exception du BFCC qui est mono-articulaire (fléchisseur du genou uniquement). Ils sont aussi abducteurs du membre inférieur a minima. Durant le cycle de course, les muscles ischio-jambiers jouent un rôle principal pendant la phase d'oscillation. En se contractant, ils coordonnent l'extension de hanche et préviennent l'extension excessive du genou. A la fin de la phase d'oscillation, ils sont responsables d'une part importante de l'absorption énergétique. Les muscles ischio-jambiers sont les muscles antagonistes principaux du muscle quadriceps femoris (QF). De par leur attache sur la tubérosité ischiatique, ils ont une influence directe sur la position du pelvis, en étant situé entre la colonne vertébrale et les membres inférieurs.

En plus de leur fonction commune, les muscles ischio-jambiers ont des particularités. Ainsi, par leurs insertions distales distinctes, chaque muscle va générer une contraction dans un plan et dans une direction différente. Ils ont ainsi un rôle de rotation de genou différente : rotation médiale pour le SM et le ST, rotation latérale pour le BF. Cette dernière concerne à la fois le tibia et la fibula, ce qui permet de prévenir la rotation interne du tibia à l'extension notamment. Le BF tient une part prépondérante dans la réduction du transfert antérieur du tibia, et donc de la mise en tension imposée au ligament croisé antérieur lors de la contraction du QF. De plus, le BF, avec son insertion distale sur le bord latéral de la fibula et du tibia influence la stabilité de l'angle postéro-latéral du genou.

Leur implication mesurée par électromyographie (EMG) ou imagerie fonctionnelle (IRM) diffère selon les exercices et les activités (Bourne et al. 2016; Mendez-Villanueva et al. 2016).

Il diffère par exemple entre la marche et la course (Dorn, Schache, et Pandy 2012). Les muscles ischio-jambiers présentent ainsi différentes caractéristiques d'activation à l'EMG lors du sprint (Higashihara et al. 2010). Ainsi, les demandes d'activations du BF et du SM sont élevées avant et après le contact du pied au sol du fait de leur fonction d'extenseurs de hanche, alors que le ST montre d'abord une activation élevée lors du contrôle de l'extension du genou lors de la phase d'appui tardive et lors de la phase d'oscillation moyenne.

De plus, l'exploration de l'activité électromyographique (EMG) lors d'une contraction isométrique maximale retrouve une activité plus importante pour le BFCL que pour le SM, expliquant probablement au moins partiellement que le BFCL soit le muscle ischio-jambier le plus souvent concerné par les lésions (Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012).

Points clés de la partie A :

- Les muscles ischio-jambiers sont situés à la face postérieure de cuisse, et sont au nombre de 3 : le semi-tendineux, le semi-membraneux, et le biceps fémoral qui est composé de deux chefs : le chef court et le chef long.
- L'anatomie des ischio-jambiers est complexe, et chaque muscle a ses propres particularités anatomiques.
- Malgré une fonction commune de fléchisseur de genou, les 4 chefs musculaires ont une fonction qui leur est propre.

B - Lésions des muscles ischio-jambiers

1- Epidémiologie et facteurs de risque

La lésion musculaire des ischio-jambiers est le type de blessure musculaire le plus fréquent, et son incidence ne baisse pas, et a même tendance à augmenter (Edouard, Branco, et Alonso 2016; Ekstrand et al. 2022; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). Tous les sports associant de la course à haute vitesse et des accélérations, mais aussi des étirements, des frappes ou des sauts sont concernés, que ce soit, entre autres, le soccer, le rugby, l'athlétisme (Carl M. Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013; Bisciotti et al. 2019; J. H. M. Brooks et al. 2005; Crema et al. 2018; Edouard et al. 2021; Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Fitzpatrick et al. 2018a; Gabbe et al. 2006; Hallén et Ekstrand 2014; Macdonald et al. 2019a; Mendez-Villanueva et al. 2016b; Orchard et Seward 2002; Rettig, Meyer, et Bhadra 2013; Williams et al. 2013).

Dans la pratique du football (soccer), l'épidémiologie est particulièrement détaillée chez les sportifs professionnels depuis une vingtaine d'années (Ekstrand et al. 2022; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). On peut constater que le nombre de blessures et le nombre de jours d'absences engendrées ont doublées sur ces 20 dernières années, avec une augmentation annuelle de 4% (Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). De plus, sur les 8 dernières années, ce taux de blessure a augmenté que ce soit pendant un match ou en entraînement (Ekstrand et al. 2022). Par ailleurs, la part de blessure des ischio-jambiers a nettement et rapidement augmentée chez les footballeurs professionnels, puisqu'elle est passée de 12% au début des années 2000 à 24% sur la saison 2021/2022 (Ekstrand et al. 2022). Cela pourrait être lié avec l'intensification des entraînements et des calendriers de match toujours plus surchargés. Ce qui est intéressant de noter dans cette population de footballeur professionnel est le caractère à la fois fréquent (18% de l'ensemble des lésions des ischio-jambiers) mais aussi le caractère précoce de la récurrence (les deux tiers ont lieu dans les deux mois suivants le retour au sport). Il est important de noter que, parallèlement à cette augmentation de fréquence de blessure des muscles ischio-jambiers chez les footballeurs professionnels, la fréquence de l'ensemble des blessures avait diminué de manière significative sur les 18 dernières années (Ekstrand et al. 2021a). La baisse est d'environ 3 à 4% par an, que ce soit lors des matches ou lors des entraînements (Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). Toutefois, lorsqu'on regarde

de manière plus précise, on s'aperçoit que les lésions ligamentaires ont baissé de 7% alors que l'ensemble des blessures musculaires est resté stable, que ce soit en match ou à l'entraînement. Par ailleurs, les conséquences des blessures sont restées stables, et le taux de récurrence et les jours d'absence ont diminué que ce soit en match ou à l'entraînement.

Ces blessures musculaires ont d'importantes conséquences sur les athlètes. D'abord, l'arrêt sportif expose à un arrêt des compétitions. De plus, la suspension des entraînements est préjudiciable et risque d'entraîner une baisse de performance. Chez le sportif professionnel ou semi-professionnel, il peut exister une perte financière résultant de ces absences en compétition et de la baisse de performance. De plus, le haut risque de récurrence expose à ces préjudices de manière cumulée, ce qui peut être particulièrement problématique lorsque la récurrence survient de manière précoce après la lésion initiale (Alonso et al. 2012; Dalton, Kerr, et Dompier 2015; Edouard et al. 2021; Edouard, Branco, et Alonso 2016; Ekstrand et al. 2022; Ekstrand, Häggglund, et Waldén 2011; Gouttebauge et al. 2016).

Les facteurs de risque identifiés de lésions des ischio-jambiers sont à la fois extrinsèques et intrinsèques. Concernant les facteurs de risque intrinsèques, c'est-à-dire lié à l'individu lui-même, on retrouve : l'âge élevé (Freckleton et Pizzari 2013), le déficit de force musculaire (Sugiura et al. 2008), une asymétrie droite/gauche du ratio IJ/Q (Croisier et al. 2008a), un déficit d'excitabilité des IJ (Fousekis et al. 2011), ou d'autres blessures du membre inférieur (Malliaropoulos et al. 2011a). Un antécédent de blessure des ischio-jambiers semble être le facteur de risque admis de manière la plus consensuelle (Fousekis et al. 2011). Le poids, la taille et l'IMC ne semblent pas avoir de franche influence (Freckleton et Pizzari 2013). Une revue systématique de la littérature avec méta-analyse (Green et al. 2020) sur 78 études et 8319 blessures, dont 967 récurrences, sur plus de 71000 athlètes, a permis récemment de d'apporter un regard éclairé sur les facteurs de risque de première blessure des muscles ischio-jambiers ou de récurrence. Un total de 179 facteurs de risque potentiels étaient explorés. Celle-ci a permis de conforter l'idée que les deux principaux facteurs de risque de lésions musculaires des ischio-jambiers sont l'âge élevé et un antécédent de blessure aux ischio-jambiers. De plus, le caractère récent de l'antécédent de blessure aux muscles ischio-jambiers était un facteur de risque supplémentaire. Ils retrouvaient aussi comme facteur de risque une rupture du ligament croisé antérieur, une blessure au mollet, et les sports exposés aux courses de vitesse et aux accélérations, un déficit de force dans les muscles ischio-jambiers. Par

ailleurs, ils retrouvaient un risque plus élevé pour les postes à risque de course rapide, ainsi qu'un calendrier sportif chargé, et un haut niveau de compétition. Il semble donc y avoir une origine multifactorielle aux lésions musculaires des ischio-jambiers.

Au niveau des facteurs de risque extrinsèques, on retient essentiellement un échauffement inadéquat et la fatigue musculaire. Comme toutes les blessures musculaires, le manque d'échauffement semble pouvoir être à l'origine de blessures, l'échauffement permettant la création d'une chaleur musculaire qui modifie les propriétés fibro-élastiques du muscle et lui permet d'améliorer l'extensibilité des fibres musculaires et conjonctives (McCrary, Ackermann, et Halaki 2015). Toutefois, ce critère est assez subjectif à évaluer et donc à affirmer. De plus, la fatigue musculaire est un élément souvent retrouvé lors des blessures musculaires, mais qui semble particulièrement présent lors des blessures des ischio-jambiers. Cette fatigue peut être prolongée (quelques jours voire semaines), ou ponctuelle lors de l'activité sportive, ces blessures étant plus souvent présentes en fin d'activité (fin d'entraînement ou de match) (John H. M. Brooks et al. 2006).

2- Classifications des lésions musculaires des ischio-jambiers

La lésion du « muscle » squelettique, au sens large du terme, peut concerner ses différents éléments, à savoir le muscle, le tendon, l'aponévrose, mais aussi les jonctions entre ses structures, à savoir les jonctions tendino-musculaires et musculo-aponévrotiques (aussi appelé myo-facial) (Figure 5).

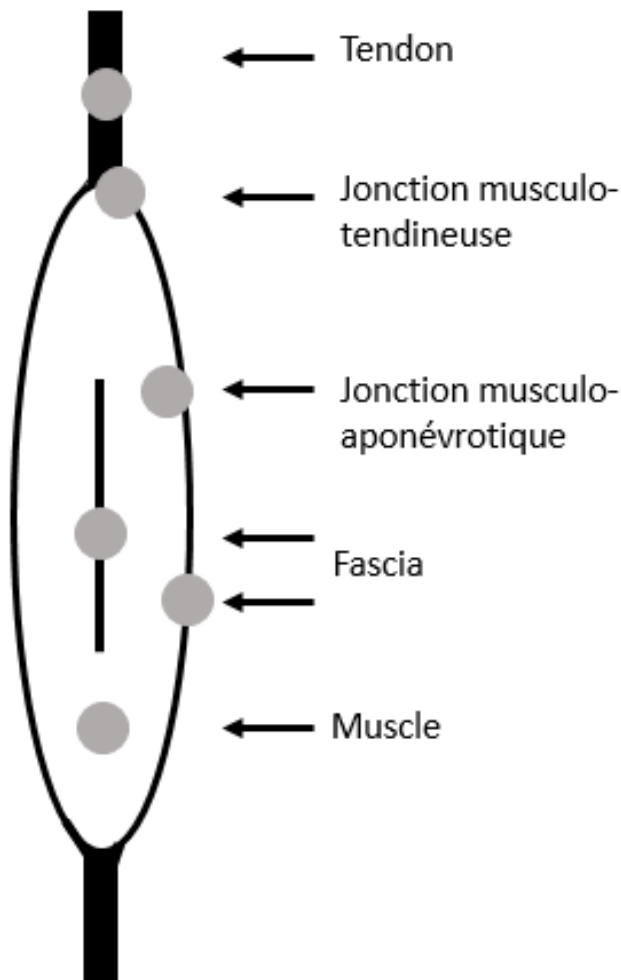


Figure 5. Schéma simplifié de l'anatomie du complexe tendino-musculaire.

Les différentes atteintes possibles des blessures sont schématisées par des ronds gris.

Ces structures ont différents niveaux de résistance aux forces de contrainte (Beltran et al. 2012a; Linklater et al. 2010a; Pollock et al. 2014a, 2021a). Ainsi, la blessure musculaire correspond à la lésion d'un muscle avec destruction d'une ou plusieurs fibres musculaires et éventuellement de structures aponévrotiques (fascia, tendon) au contact. Elle est de gravité variable, en fonction notamment de l'étendue de la lésion et du nombre de fibres musculaires rompues.

Historiquement, les lésions musculaires étaient séparées en trois grades : Un simple étirement des fibres musculaires (grade I) ; Une déchirure partielle (grade II) ; Une déchirure complète (grade III). Une deuxième classification (Labareyre (de) H., Roger B., Thelen P 2002) distingue « l'élongation » qui correspond à un étirement du muscle avec déchirure de quelques fibres,

sans saignement ; « le claquage » musculaire (ou "déchirure incomplète") qui représente une déchirure d'un nombre plus ou moins important de fibres musculaires (un hématome est présent) ; et la « rupture musculo-tendineuse complète » qui se caractérise par une déchirure totale du muscle et de son tendon (un hématome est présent et le muscle est déformé). Une autre classification des lésions musculaires a été décrite (Rodineau J. 2005) : stade 0 (atteinte réversible de la fibre musculaire sans atteinte du tissu de soutien avec récupération totale en quelques heures) ; stade 1 : atteinte irréversible de quelques fibres musculaires aboutissant à leur nécrose sans atteinte du tissu conjonctif de soutien (récupération totale en quelques jours) ; stade 2 : atteinte irréversible d'un nombre réduit de fibres musculaires et atteinte minime du tissu conjonctif de soutien (récupération qui peut être obtenue en une dizaine de jours) ; Stade 3 : atteinte irréversible de nombreuses fibres musculaires, atteinte marquée du tissu conjonctif de soutien et formation d'un hématome intramusculaire localisé (récupération en 4 à 12 semaines) ; Stade 4 : rupture ou désinsertion musculaire complète (récupération longue mais variable selon le muscle touché). Ces classifications sont importantes car elles peuvent être retrouvées aux examens d'imagerie et peuvent aider le clinicien à décider de la meilleure stratégie pour la récupération après une blessure.

Ces lésions par déchirure musculaire doivent être différenciées de la crampe (contraction intense, brutale, très douloureuse et involontaire du muscle, au décours immédiat d'un effort), des courbatures (douleurs musculaires diffuses, apparaissant souvent le lendemain d'un effort physique intense), et de la contracture (douleur musculaire survenant à distance d'un effort trop intense).

3- Mécanisme lésionnel

Les lésions musculaires des ischio-jambiers peuvent survenir à la suite d'un mécanisme extrinsèque, par contact direct avec un élément extérieur (ex : choc externe entre deux joueurs lors d'un match de football) (Danielsson et al. 2020). Toutefois, le mécanisme le plus fréquent (90% des cas) est de cause intrinsèque (ou indirecte), indépendamment de tout facteur extérieur (Danielsson et al. 2020). La lésion dans ce cas est liée à un excès de contrainte, en général lors d'une contraction excentrique ou d'une contraction en position d'étirement. Parmi ces lésions intrinsèques, on distingue plusieurs mécanismes d'apparition. Les deux principaux sont lors d'une phase de course à haute intensité (Schache et al. 2012), et

le deuxième lors d'un mécanisme d'étirement, en général à intensité moindre (Carl M. Askling et al. 2007b). Par ailleurs, on retrouve aussi des lésions lors des sauts ou de leur réception, mais aussi d'autres mécanismes plus rares (ex : déplacement latéral) (Jokela et al. 2023). La gravité des lésions intrinsèques semble plus importante que celle des lésions extrinsèques, avec un temps de retour au sport plus long et un risque de récurrence plus élevé (Danielsson et al. 2020; Freckleton et Pizzari 2013).

Pour bien comprendre les lésions musculaires, il faut d'abord bien comprendre le fonctionnement de la course. Ainsi, la course est composée de deux phases principales : la phase d'oscillation et la phase d'appui, chacune décomposée en phase précoce, moyenne et tardive (en anglais, respectivement « early/mid/late swing », et « early/mid/late stance »). Une revue de la littérature récente (Kenneally-Dabrowski et al. 2019) a synthétisé la mécanique musculo-tendineuse des ischio-jambiers et l'activité EMG pendant la course à grande vitesse, et la manière dont ils peuvent être liés au risque de blessure. Ainsi, il semble que la contraction excentrique importante, caractérisée par une tension musculo-tendineuse maximale et un travail négatif (absorption énergétique) pendant la phase tardive de l'oscillation (late swing), est largement considérée comme potentiellement préjudiciable (Chumanov et al. 2012). Cependant, il est également avancé que les charges élevées sur les ischio-jambiers résultant de couples articulaires importants et de forces de réaction au sol au début de la phase d'appui peuvent causer des blessures (Kenneally-Dabrowski et al. 2019). Ainsi, bien que l'on manque encore de preuves directes, la majorité de la littérature suggère que le moment le plus probable de la blessure soit la fin de phase oscillante de la foulée.

La fragilité des IJ réside aussi dans le fait que les muscles traversent deux articulations et subissent une contraction excentrique pendant le cycle de la course (Linklater et al. 2010b). Une étude récente (Gronwald et al. 2022; Jokela et al. 2023) a analysé 14 vidéos de lésions aiguës des ischio-jambiers chez 13 footballeurs professionnels. Trois mécanismes de blessure différents ont été identifiés : le sprint, l'étirement, et les mécanismes mixtes (à la fois lié au sprint et à l'étirement). Ce dernier type paraît être le plus fréquent (43%) avant le mécanisme d'étirement (36%) et celui de sprint (21%). Avec les mécanismes de blessure, étaient analysées les actions les plus courantes au moment de la blessure : le changement de direction était le plus fréquent (29%), puis les coups de pied (29%) et la course (21%). La plupart des blessures se sont produites à une vitesse horizontale élevée ou très élevée (71%) et ont affecté le biceps

fémoral proximal de manière isolée (BF) (36%). Les positions corporelles les plus fréquentes aux moments définis de la blessure étaient un tronc neutre (43%), une flexion de la hanche de 45 à 90 degrés (57%) et une flexion du genou <45 degrés (93%), ces données sont en corrélation avec le fait que le moment le plus probable de la blessure semble être la phase oscillatoire tardive.

Les localisations des lésions varient également en fonction des sports, ce qui corrobore la particularité du rôle biomécanique de chaque muscle ischio-jambier. Ainsi, on note une prédominance des lésions du BFCL pour le sprint (par exemple, le football (Carl M. Askling et al. 2007a)) et de SM pour les sports d'étirement (par exemple, la danse (Carl M. Askling et al. 2007b, 2008)).

Ainsi, les muscles ischio-jambiers sont lésés lors d'un mécanisme intrinsèque dans la majorité des cas, et essentiellement lors d'un sprint ou d'un étirement. Leurs fragilités peuvent être expliqués par leur anatomie et par leur rôle dans le cycle de course.

4- Diagnostic

Il faut tout d'abord différencier le diagnostic de lésion musculaire des muscles ischio-jambiers, et le diagnostic de sévérité. Ainsi, le diagnostic de la blessure des muscles ischio-jambiers est essentiellement clinique. La lésion musculaire des ischio-jambiers est caractérisée par une douleur plus ou moins aiguë dans la loge postérieure de la cuisse ayant un retentissement fonctionnel allant de la simple gêne à l'impotence fonctionnelle totale. Des signes de gravité variable doivent ensuite être recherchés, concernant pour la majorité l'intensité de douleur et de gêne fonctionnelle. La douleur peut être modérée, n'empêchant pas de poursuivre l'activité en cours, mais elle peut aussi être vive, brutale, et entraînant l'arrêt immédiat de l'effort. Dans ce cas, l'appui sur la jambe lésée est impossible. La douleur peut être ressentie comme un "coup de poignard", avec même parfois une chute en plein effort. Un hématome et un gonflement (œdème) peuvent apparaître, en général rapidement après la blessure, au niveau de la face postérieure de cuisse puis progressivement au niveau de la face postérieure de jambe (diffusion de l'hématome) (Figure 6). Les mouvements peuvent être limités, voire

impossibles. En cas de rupture, un vide musculaire et une disparition du relief musculaire peuvent apparaître.

A l'examen clinique, les signes en faveur du diagnostic sont une douleur déclenchée par la palpation, l'étirement, ou la contraction contre résistance. L'examen clinique permet aussi de rechercher des éléments de gravité : une faiblesse musculaire, une difficulté à la marche, un trouble de l'équilibre, une forte intensité de la douleur, le retentissement dans les activités de la vie quotidienne, la limitation sur le fonctionnement musculaire (contraction, extensibilité).

Le bilan d'imagerie permet de confirmer le diagnostic et de rechercher des signes de gravité (Partie C du chapitre II).



Figure 6. Photographie d'une blessure des ischio-jambiers.

Très volumineux hématome des parties molles de la face postérieure de la cuisse, avec diffusion vers le bas à la partie postéro-supérieure de la jambe. Notez le caractère semi-récent de l'hématome (couleur verdâtre et jaunâtre de l'hématome en périphérie) l'hématome est initialement bleu/violet, couleur de l'hème, qui se transforme en biliverdine qui est verte puis en bilirubine qui est jaune. Notez aussi que la diffusion de l'hématome n'a pas de valeur localisatrice, la diffusion étant déclive dans les parties molles.

5- Prise en charge thérapeutique initiale

Lors d'une blessure, et afin d'éviter une récurrence précoce, des mesures initiales de protection (limiter l'utilisation des muscles ischio-jambiers), de gestion de la douleur et de l'œdème (glaçage, surélévation...), d'exercices thérapeutiques de renforcement et de proprioception des autres régions musculaires (muscles lombo-pelviens notamment) puis des ischio-jambiers, vont être réalisées. Ces techniques vont permettre progressivement de remettre en charge les ischio-jambiers de manière sûre, jusqu'à un travail concentrique et excentrique des IJ à haute intensité, en respectant à chaque étape le seuil de la douleur, et après avoir vérifié au préalable par des manœuvres cliniques que les objectifs spécifiques de chaque étape étaient atteints. La reprise du sport doit ainsi se faire de manière très progressive, en réintroduisant progressivement les activités sportives de plus en plus sollicitantes, tout en respectant la règle de la non-douleur. Ainsi, sont conseillés de réaliser d'abord la marche lente, puis progressivement la marche de plus en plus rapide, puis le footing lent et de plus en plus rapide, d'abord en ligne droite, puis avec des changements de direction, puis enfin des accélérations et le sprint.

L'objectif de la rééducation post-blessure est la reprise sportive ou de l'entraînement (« return to sport » ; « return to full training ») avec un niveau de performance pré-lésionnel et avec un minimum de risque de récurrence.

6- Reprise du sport et risque de récurrence

Les lésions musculaires des ischio-jambiers présentent deux problèmes principaux : un temps de retour au sport élevé et difficile à prédire, et un taux de récurrences très élevé (John H. M. Brooks et al. 2006; Dalton, Kerr, et Dompier 2015; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016; Fitzpatrick et al. 2018b; Gouttebauge et al. 2016; van Heumen et al. 2017; Wangensteen et al. 2016). Ces deux notions sont intimement liées, car on sait que la majorité des récurrences a lieu peu de temps après le retour au sport, et peut donc être attribuée à un retour au sport trop précoce (Opar, Williams, et Shield 2012).

Le taux de récurrence pour les lésions intrinsèques peut être estimé à environ 15-20%. La majorité des récurrences survient dans les jours ou semaines après la reprise du sport, avec des récurrences souvent de gravité supérieure à la première avec durée de convalescence plus

longue (Wangenstein et al. 2016). A ce problème s'ajoute celui de la période de convalescence très variable pouvant s'étaler de quelques jours à plusieurs mois pour les lésions les plus graves.

Malgré les très nombreux travaux sur les critères cliniques ou d'imagerie pour prédire un retour au sport avec le risque minimal de récurrence, aucun consensus n'est actuellement trouvé. Sur le plan clinique, sont fréquemment recherchées l'absence de douleur à la palpation, l'absence de différence de force (excentrique, concentrique, seul ou associé à un ratio IJ/Q) entre les deux côtés à la contraction contrariée ou lors des tests isométriques, l'absence de douleur provoquée à la contraction, l'absence de déficit d'extensibilité (C. Askling, Karlsson, et Thorstensson 2003; Malliaropoulos et al. 2011b). De plus, des tests cliniques récemment décrits, tels que le « H-Test » (C. M. Askling, Nilsson, et Thorstensson 2010) ou le « Single leg hamstring bridge » (Freckleton, Cook, et Pizzari 2014), ont permis de donner des arguments supplémentaires pour autoriser ou non le retour au sport. Des algorithmes décisionnels ont même récemment été proposés (Erickson et Sherry 2017). Sur le plan de l'imagerie, les facteurs de risque de récurrence sont encore très débattus (voir chapitre « intérêt de l'IRM dans les blessures des ischio-jambiers »). Une revue de la littérature (van der Horst et al. 2016) a permis de refaire le point sur les différentes définitions et critères de retour au sport après une lésion aux ischio-jambiers. Il est tout d'abord intéressant de noter que seulement 52% des articles définissent le « RTP » (« return to play » = retour au sport). Par contre, dans ces articles définissant le RTP, de nombreux critères sont utilisés pour établir le retour au sport, critères qui sont regroupés en 5 sous-catégories : l'absence de douleur (notamment à la palpation et durant l'exercice habituel), une force superposable au côté opposé (moins de 10% de différence), une souplesse identique, une autorisation du staff médical, et une performance fonctionnelle. Une revue systématique de la littérature sur les éléments de la décision sur le délai de retour au sport suivant une blessure des ischio-jambiers (Hickey et al. 2017), établi sur 9 articles, met en évidence l'importance accordée au soulagement de la douleur pour autoriser le retour au sport après une blessure aux ischio-jambiers, ainsi que le recours à des évaluations cliniques subjectives et à des tests de performance en tant que critères de temps de retour au sport. Ces résultats suggèrent la nécessité de critères plus objectifs et cliniquement pratiques, permettant une approche plus factuelle de la progression de la réadaptation et réduisant potentiellement l'ambiguïté du processus de prise de décision en

matière de retour au sport. Une revue récente (Pieters et al. 2021) a exploré les critères de retour au sport après une lésion musculaire des ischio-jambiers. Les auteurs partent du constat que les tests fonctionnels et les tests d'entraînement spécifiques au sport constituent la base du processus de prise de décision, et que ces critères conduisent à un délai moyen de reprise du sport entre 11 et 25 jours après une blessure de grade 1 ou 2. Cependant, les taux élevés de nouvelles blessures indiquent une possible inadéquation des critères actuels de retour au sport (25% des nouvelles blessures surviennent au cours de la première semaine suivant la retour au sport et au même endroit que la première blessure). L'absence de prise en compte du temps de guérison biologique pourrait expliquer ces récurrences au retour au sport. Les auteurs proposent de respecter dans tous les cas le « temps de cicatrisation naturel » d'une lésion musculaire des ischio-jambiers, estimé à 4 semaines. A partir de ce délai, et uniquement après ce délai, des tests cliniques seraient réalisés afin d'estimer si le sportif peut reprendre une activité sportive en sécurité.

7- Prévention

La prévention se décompose selon l'Organisation Mondiale de la Santé de la prévention primaire (éviter le premier épisode lésionnel) et la prévention secondaire (éviter la ou les récurrences). La prévention primaire est particulièrement importante, car on le rappelle, le facteur de risque principal de présenter une blessure des ischio-jambiers est un antécédent de blessure aux ischio-jambiers (Opar, Williams, et Shield 2012). La prévention des récurrences (prévention secondaire) nécessite une prise en charge optimale de la lésion, du diagnostic à la reprise sur le terrain. La prévention repose sur une prise en charge multifactorielle, avec entre autres sur le travail musculaire excentrique des ischio-jambiers et la recherche d'un déséquilibre musculaire.

Concernant le travail musculaire excentrique des IJ, le « NHE » (Nordic Hamstring Exercise) (Figure 7) est l'exercice de renforcement excentrique des ischio-jambiers le plus connu et le plus utilisé (C. Askling, Karlsson, et Thorstensson 2003). La contraction excentrique peut se définir comme une contraction dans laquelle le système musculo-tendineux s'allonge tout au long de la contraction à la suite de l'application d'une force contre le système musculo-tendineux, supérieure à la force produite par le muscle. Du point de vue de la production de force, la contraction excentrique génère une tension mécanique supérieure à celle des

contractions isométriques et concentriques et entraîne une plus grande adaptation musculaire (Franchi et al. 2014). Le NHE consiste à résister à une chute vers l'avant, en partant d'une position à genou, obligeant à réaliser une contraction excentrique des ischio-jambiers pour retenir la descente. Cet exercice, facile à mettre en place, semble associé à une diminution du risque de blessure, et permettrait même de réduire de près de la moitié des blessures des ischio-jambiers (Al Attar et al. 2017; van Dyk, Behan, et Whiteley 2019; Sugiura et al. 2017).



Figure 7. Photographie d'un exemple de rééducation des muscles ischio-jambiers : le Nordic Hamstring Exercise (NHE).

Image capital Sports Medicine; (<https://capitalsportsmed.co.nz>). Cet exercice consiste s'asseoir sur les genoux, de se coincer les chevilles ou demander à quelqu'un de le faire, puis de s'abaisser en direction du sol aussi lentement que possible. Au bout d'un moment, la force de la gravité est plus forte que la résistance des ischio-jambiers et le corps chute en avant. Il faut ensuite se remettre en position puis répéter le mouvement.

Le NHE est un exercice adapté qui permet de renforcer les ischio-jambiers de façon excentrique. Cependant, cet exercice présente quelques spécificités, résidant dans la réalisation, la sollicitation des différents chefs musculaires des ischio-jambiers et les adaptations générées par un entraînement basé sur ce type d'exercice. Ainsi, le « nordic hamstring » est un exercice de renforcement musculaire excentrique sollicitant de manière

préférentielle les chefs médiaux des ischio-jambiers (Whyte et al. 2021), du fait des spécificités de sa réalisation. Il semble responsable d'adaptations structurales et neuromusculaires qu'il génère aux muscles ischio-jambiers, qui sont à priori responsables de l'effet protecteur de cet exercice (Hegyí et al. 2018).

Concernant la recherche d'un déséquilibre musculaire, l'évaluation de la force peut se faire par le NHE (Matthew N. Bourne et al. 2015; Opar et al. 2015) ou par une évaluation isocinétique (Croisier et al. 2008b; Yeung, Suen, et Yeung 2009). Ainsi, un déficit doit être corrigé par des exercices dédiés pour éviter les blessures. Le NHE peut être utilisé seul ou inclus dans un programme de prévention. Ainsi, le FIFA 11 (et 11+, version améliorée) est un programme de renforcement musculaire et d'étirement divisé en trois parties pour chaque session (entraînement ou match). La partie 2 est réalisée à la fin de la session, et la partie 1 et 3 sont réalisées au début de la session (Thorborg et al. 2017). La prévention des blessures des ischio-jambiers et la prise en charge des facteurs de risque a aussi été étudiée dans une revue de la littérature récente avec méta-analyse des essais contrôlés randomisés (Rudisill et al. 2022), et a inclus 108 articles. Il a permis de montrer notamment que l'entraînement excentrique permet de réduire l'incidence d'une blessure aux ischio-jambiers de 57 à 70%. La force concentrique des ischio-jambiers a augmenté avec les méthodes d'entraînement pliométrique, concentrique, la méthode FIFA11+, lorsqu'on restreint le flux sanguin, lors des vibrations corps entier, des squats, tandis que la force excentrique a bénéficié de l'entraînement excentrique, concentrique, et pliométrique. Les étirements statiques ont produit des gains de flexibilité plus importants que la facilitation neuromusculaire proprioceptive et les étirements dynamiques, bien que les effets des techniques statiques aient été plus éphémères. La longueur du fascicule a augmenté avec l'entraînement excentrique et l'entraînement de sprint et a diminué avec l'entraînement concentrique. Bien que le rapport conventionnel ischio-jambiers/quadriceps (H/Q) soit resté identique, le rapport fonctionnel H/Q s'est amélioré de manière significative avec l'entraînement excentrique. En outre, l'entraînement excentrique a réduit l'asymétrie de force des membres, tandis que le rapport H/Q et les déséquilibres de flexibilité ont été normalisés par l'entraînement en résistance et les étirements statiques.

Concernant la prévention des blessures des ischio-jambiers dans les équipes de football (soccer), une revue de la littérature récente avec méta-analyse (Gronwald et al. 2022) a étudié

les professionnelles et semi-professionnelles, en sélectionnant 8 articles résultant en 170221h d'exposition. L'objectif était d'évaluer le bénéfice de la mise en place d'un protocole de prévention des blessures des ischio-jambiers. 165 blessures aux ischio-jambiers étaient présents dans le groupe intervention, contre 224 dans le groupe contrôle. Toutes les méthodes pratiquées pour réduire le risque de blessure aux ischio-jambiers, que ce soit le NHE, le FIFA11+ ou des exercices pour la stabilité du tronc ou l'entraînement à l'équilibre, ont prouvé leur efficacité dans la réduction de la survenue d'une blessure aux ischio-jambiers.

La difficulté réside aussi dans l'applicabilité de ces mesures : même si l'intérêt de la mise en place de mesures de prévention semble désormais communément admis, la réalisation d'un programme de prévention des blessures n'est pas systématique au sein des équipes sportives (Thorborg et al. 2017). La bonne entente et les discussions entre les entraîneurs et le staff médical est primordial pour trouver un compromis entre performance et prévention des blessures.

Ainsi, comme pour la majorité des blessures musculaires, la prévention doit avoir une approche multifactorielle, en prenant en compte tous les facteurs de risque potentiels de survenue des lésions musculaires des ischio-jambiers, comme par exemple la souplesse, la contrôle de l'appui, la charge d'entraînement, le contrôle postural et la technique sportive, notamment en sprint.

Points clés de la partie B :

- Les muscles ischio-jambiers sont les muscles les plus souvent concernés par les blessures.
- Leurs particularités anatomiques et fonctionnelles participent probablement à leur susceptibilité à la blessure.
- Le diagnostic est essentiellement clinique, le bilan d'imagerie permet de confirmer le diagnostic et de rechercher des signes de gravité.
- Le risque de récurrence est très important lors d'une blessure musculaire des ischio-jambiers, et survient en général précocement à la reprise sportive.
- L'estimation du temps de retour au sport est donc un enjeu majeur de la prise en charge.
- La prévention, notamment par le renforcement musculaire excentrique, a montré son efficacité dans la réduction de survenue des blessures.

C - Exploration par Imagerie

1- Intérêt de l'imagerie dans le diagnostic des lésions musculaires des ischio-jambiers

Le diagnostic d'une lésion musculaire des ischio-jambiers commence par l'examen clinique. Les principaux éléments du diagnostic clinique sont, lors d'un mécanisme concordant (course, étirement, saut...), la survenue d'une douleur brutale à la partie postérieure de cuisse, associée à une douleur provoquée à la palpation, à l'étirement et à la contraction notamment excentrique des IJ (Geoffrey M. Verrall et al. 2003). Toutefois, il existe de nombreux faux positifs : un diagnostic clinique de lésion des IJ ne retrouve pas systématiquement une lésion des IJ à l'imagerie (Koulouris et Connell 2005). Les raisons sont diverses, parfois évidentes quand l'imagerie montre un diagnostic différentiel (notamment une lésion d'un autre groupe musculaire, comme par exemple le quadriceps, le grand fessier, les adducteurs), parfois moins évidente quand l'imagerie est normale, et fait discuter alors une douleur résiduelle des IJ (Gibbs et al. 2004) ou une douleur projetée d'une souffrance neurale. L'imagerie peut donc tout d'abord confirmer le diagnostic de lésions musculaires des ischio-jambiers. Il permet aussi d'explorer l'atteinte sur le plan tissulaire, et notamment de mettre en évidence une atteinte conjonctive, ce qui n'est pas possible cliniquement (Pollock et al. 2016a). Elle va permettre de différencier une atteinte conjonctive d'une atteinte tendineuse ou musculaire isolée. Par ailleurs, il permet de faire de bilan de gravité, et de poser une éventuelle indication chirurgicale, en cas de rupture complète, et en évaluant la rétraction tendino-musculaire, et en recherchant un arrachement osseux de l'enthèse. Il permet aussi de rechercher une cicatrice fibreuse, témoin d'une atteinte plus ancienne, et pouvant être en rapport ou non avec les douleurs actuelles. Ainsi, il est important de différencier une nouvelle lésion d'une cicatrice inflammatoire toujours douloureuse, ou d'une nouvelle lésion sur la cicatrice. Il permet aussi d'évaluer l'étendue de l'atteinte, avec les mesures des dimensions de la lésion, de la surface atteinte, et permet ainsi d'estimer le volume musculaire concernée par la lésion. Ainsi, en fonction de ces différents paramètres, il permet de classer la lésion selon une ou plusieurs classification(s) existante(s) (Paton et al. 2023; Peetrons 2002a; Pollock et al. 2014a).

De plus, l'examen d'imagerie peut intervenir pour suivre l'évolution de la lésion. Ainsi, il peut être intéressant de refaire un examen d'imagerie pour évaluer l'évolution de la lésion et faire état de l'avancée de la cicatrisation.

Le choix de l'imagerie réalisée va dépendre de plusieurs paramètres. Ainsi, les modalités d'imagerie diffèrent en fonction des informations qu'ils apportent sur la blessure en elle-même, mais aussi en fonction de leur disponibilité et de leur prix. La modalité d'imagerie peut aussi varier en fonction de l'athlète, en fonction de son niveau, de son âge, de ses antécédents de blessure, et de ses impératifs sportifs. Les habitudes locales et de l'expérience de l'opérateur sont aussi des facteurs qui vont intervenir dans le choix de l'imagerie. Nous allons aborder les avantages, inconvénients et limites de chacun des images disponibles.

2- Echographie : modalités et exploration

a - Echographie : principes généraux

L'échographie est un examen d'imagerie en coupe, utilisant les principes d'absorption et de réflexion des ondes ultrasonores (Aldrich 2007). Grâce à une sonde émettrice et réceptrice d'ultrasons posés sur la peau du patient en regard de la zone à explorer, on enregistre la variation de vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les tissus étudiés. Ainsi, les ultrasons sont envoyés dans un périmètre délimité (souvent trapézoïdal), et les échos enregistrés sont des signatures des obstacles qu'ils ont rencontrés. L'échogénicité est l'aptitude d'un tissu à rétrodiffuser les ultrasons. Cela permet d'obtenir une image qui est analysé par l'opérateur. Ainsi, les structures laissant passer les échos sont dits « anéchogènes », il s'agit par exemple des liquides, et qui seront représentés en noir sur l'écran. Inversement, les structures échogènes comme l'os, les calcifications ou l'air, vont renvoyer les échos, et leur représentation sera blanche sur l'écran. Entre ces deux extrêmes, les structures seront représentées en échelle de gris selon leur échogénicité.

La profondeur des tissus analysés varie en fonction de la fréquence de l'onde ultrasonore envoyé. Ainsi, si la fréquence est basse, les tissus situés plus en profondeur vont pouvoir être analysés, alors que pour une fréquence haute, seuls les tissus superficiels vont pouvoir être explorés. Pour des raisons mécaniques, on considère que le contact entre la sonde et la peau du patient ne peut pas être parfait et qu'il existe donc une fine couche d'air entre eux-ci,

nécessitant obligatoire l'utilisation d'un gel entre la sonde et la peau du patient. L'utilisation associée du doppler permet l'étude des flux sanguins. Différents réglages permettent d'optimiser l'utilisation de l'échographe en fonction de la structure analysée : la fréquence d'émission, le gain, mode fondamental ou harmonique, modification du faisceau d'ultrasons, focalisation du faisceau, cadence d'acquisition.

L'échographie présente plusieurs avantages. Tout d'abord, c'est un examen non invasif et non douloureux. Il est rapidement disponible et facile à utiliser de premier abord. Il n'utilise pas de rayons X, rendant son utilisation idéale chez des patients jeunes ou des femmes enceintes, ou pour des réalisations récurrentes. L'échographie n'a pas de risque particulier. L'appareil d'échographie est désormais peu lourd et facilement transportable, y compris par exemple au lit du patient. L'échographie donne des images dynamiques et en temps réel, ce qui en fait un bon outil pour guider des prélèvements comme les biopsies ou réaliser des infiltrations localisées de manière extrêmement précise. L'échographie permet de visualiser la structure et le mouvement des organes ainsi que les vaisseaux sanguins artériels et veineux. C'est une technique d'imagerie en temps réel, ce qui permet de compléter l'interrogatoire et l'examen clinique en cours d'examen. En imagerie musculo-squelettique, l'échographie est très largement utilisée (Becciolini, Bonacchi, et Bianchi 2019; Fee et al. 2022; Peetrans 2002), permettant notamment une étude comparative (avec le côté controlatéral sain) et dynamique (mobilisation active ou passive des membres, contraction et relâchement musculaire...), permettant particulièrement de combiner exploration par imagerie et interrogatoire et examen clinique de manière synchrone. C'est un excellent examen d'imagerie pour l'étude fine de la vascularisation, et notamment l'hyperhémie en cas d'inflammation d'une structure (Crema et al. 2015).

L'examen échographique présente toutefois des limites (Becciolini, Bonacchi, et Bianchi 2019; Fee et al. 2022; Peetrans 2002). Ainsi, les ultrasons ne passent pas à travers l'air; par conséquent, les structures gazeuses et osseuses sont des obstacles à l'exploration échographique. L'exploration en échographie est limitée en profondeur et les structures plus profondes peuvent ne pas être visibles, notamment chez les patients obèses ou très musclés. De plus, elle nécessite toutefois d'être réalisée par un opérateur entraîné. L'inconvénient principal réside dans le fait que la relecture et l'analyse ultérieure des images est très difficile. Ainsi, les images réalisées et enregistrées sont focalisées sur la zone d'intérêt le plus souvent,

sur la coupe la plus représentative, et il n'est pas réalisé un enregistrement plan par plan d'un nombre conséquent d'images. De plus, l'enregistrement d'images répétées strictement dans le même plan est difficile, et est sujet à la variation de la mobilisation de la sonde lors de l'examen par l'opérateur. Même si l'utilisation des ultrasons paraît sans risque dans la majorité des situations, on applique le principe de précaution concernant les effets thermiques et mécaniques potentiels des ultrasons notamment pour le cerveau et l'œil du fœtus.

b - Exploration des ischio-jambiers par échographie

L'exploration des ischio-jambiers par échographie présente de nombreux avantages (Campbell, Adler, et Sofka 2005; Peetrons 2002a). Elle permet tout d'abord de faire le diagnostic de blessure des ischio-jambiers (Peetrons 2002a) (Figure 8). Elle permet aussi de faire le diagnostic différentiel et de rechercher des signes de gravité comme une rupture tendineuse complète ou partielle. Elle permet aussi de voir les hématomes, les épanchements inter-aponévrotiques et les cicatrices fibreuses. Elle permet aussi d'estimer le volume de la lésion (Frouin et al. 2023; Geirsson, Christie, et Patel 1982a). Un des principaux avantages est de pouvoir interroger et examiner le patient, et ceci avant, pendant et au cours de l'échographie. Ainsi, le déclenchement de la douleur à la « palpation échographique », c'est-à-dire lors du passage de la sonde au niveau de la zone douloureuse, permet d'orienter et de focaliser l'attention du radiologue sur cette zone douloureuse.

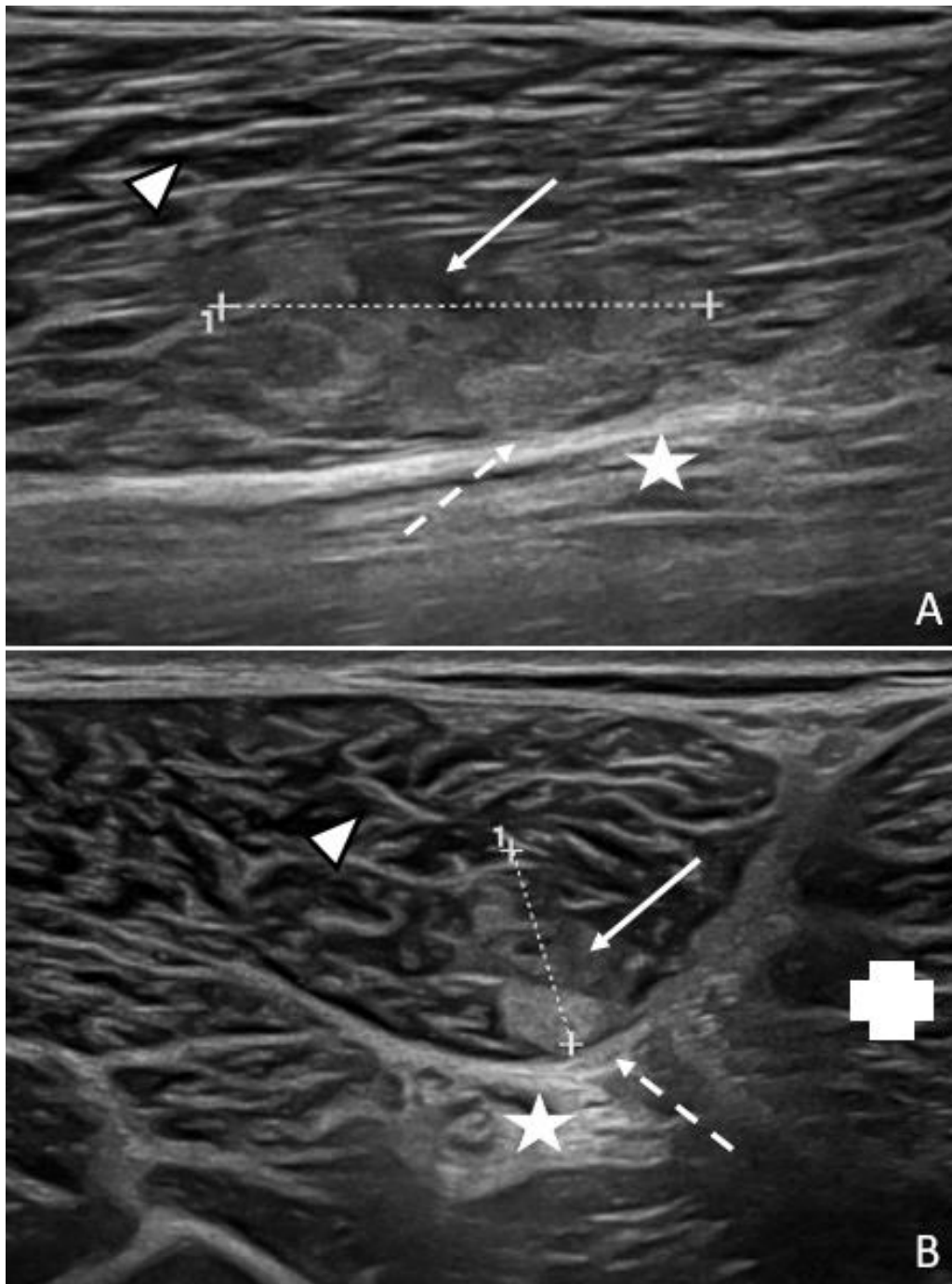


Figure 8. Exploration échographique d'une lésion des ischio-jambiers au tiers distal de la cuisse gauche.

L'échographie permet de réaliser plusieurs images dans différents plans, par exemple dans le plan sagittal (A) et axial (B). La flèche blanche continue représente la désorganisation architecturale hyperéchogène hématique de la partie postéro-médiale du chef long du muscle biceps fémoral, avec atteinte de la jonction myo-aponévrotique (flèche discontinue). La lésion est donc classée 2c selon la classification de Peetrons. Cette désorganisation est bien identifiable en comparaison au muscle sain (tête de flèche). La lésion est située juste en avant du nerf sciatique (étoile), et à proximité du muscle semi-tendineux (croix).

Il est important de noter que l'échographie peut être un outil aidant dans le traitement des blessures musculaires, en permettant de guider de manière percutanée une ponction ou une infiltration (Louis 2008). Ainsi, un hématome récent peut être aspiré, et différents liquides peuvent être injectés au sein de la blessure, comme par exemple du PRP (« Platelet-Rich Plasma », plasma enrichi en plaquettes (Rettig, Meyer, et Bhadra 2013a).

Toutefois, l'échographie a quelques inconvénients et limites. Tout d'abord, il est parfois difficile de faire l'exploration des ischio-jambiers, qui sont réputés particulièrement difficiles à explorer (Balius et al. 2019), particulièrement dans leur partie proximale (Becciolini, Bonacchi, et Bianchi 2019; Beltran et al. 2012a). De plus, il est difficile d'explorer les ischio-jambiers sans devoir appuyer un minimum sur le tissu musculaire à explorer, afin de comprimer les structures superficielles et d'obtenir une meilleure qualité d'image. L'exploration des ischio-jambiers est ainsi particulièrement difficile en échographie chez les patients obèses. De part ces contraintes de réalisation technique, le muscle est souvent déformé, et les mesures (taille, surface, volume) peuvent être biaisées (Frouin et al. 2023). De même, la moindre modification de segment de membre ou contraction musculaire influe sur la position du muscle et sa morphologie. Par ailleurs, l'exploration exhaustive des ischio-jambiers peut être très longue. Ainsi, il faut analyser 4 muscles sur l'entièreté de leur longueur, ce qui est très chronophage, notamment si l'on souhaite explorer aussi le côté controlatéral à la recherche de cicatrice fibreuse. De plus, l'aspect inflammatoire des structures est parfois plus difficile à évaluer, notamment dans les zones profondes où la nécessité de compression des tissus limite l'analyse de l'hyperhémie d'origine inflammatoire. De plus, élément primordial, les images peuvent difficilement être relues à distance de leur acquisition, à fortiori par une personne différente de celle qui a fait l'acquisition de ces images. Il n'est pas rare qu'un praticien se remette en contact avec le radiologue ayant interprété un examen d'imagerie pour en discuter, refaire le point sur le dossier du patient, et essayer de trouver la meilleure corrélation entre les images réalisées et la présentation clinique (et parfois aussi biologique) du patient. Cette confrontation des expertises est particulièrement intéressante dans les cas difficiles, et nécessite une relecture de l'imagerie, parfois plusieurs jours ou semaines après la réalisation de celui-ci. Les images d'échographie, même réalisées dans des conditions optimales, ne sont que le reflet de l'interprétation immédiate du radiologue, et ne sont pas exhaustive sur les structures d'intérêt (pas d'intégration de tout le volume). Ainsi, la

relecture des images échographiques est très limitée, même par le radiologue ayant réalisé l'examen. En recherche, la relecture des images, parfois de manière répétée, est particulièrement importante, permettant une récolte attentive et exhaustive des données. De plus, la nécessité d'avoir un temps important dédiée à l'analyse de ces données n'est pas forcément compatible avec le temps échographique et la disponibilité des patients.

3- Radiographie et Scanner : modalités et exploration

a - Radiographie : principes généraux

La radiographie (Schueler 1998) est une technique d'imagerie de transmission, utilisant les rayons X. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de hautes fréquences, produits par un tube à rayons X. C'est un tube sous vide composé d'un filament chauffé alimenté par le courant continu de haute tension. Elle permet d'obtenir un cliché dont le contraste dépend à la fois de l'épaisseur et du coefficient d'atténuation des structures traversées. Ainsi, une image dite « de projection » est créée, à la différence du scanner, de l'IRM ou de l'échographie qui sont des examens dits « en coupe ». La radiographie, utilisant des rayons X, est donc un examen irradiant, à utiliser avec prudence notamment chez les enfants et les femmes enceintes. La radiographie ne permet pas une analyse fiable des tissus dits « mous » comme le muscle ou les tendons. Il peut permettre toutefois de détecter un hématome dans les parties molles. Il est surtout utilisé pour sa bonne analyse de l'os, et peut ainsi être utile pour l'analyse des entorses à la recherche d'une avulsion.

b - Scanner : principes généraux

Le scanner, appelé aussi tomographie (TDM) ou Computed Tomography (CT), est un appareil à rayons X qui permet d'obtenir une imagerie du corps humain en coupes fines (Goldman 2007). Les images sont reconstituées par ordinateur en 2 ou 3 dimensions. La technique consiste à mesurer l'absorption des rayons X par les tissus, les rayons étant plus ou moins absorbés en fonction de la densité des tissus. Le patient est allongé sur une table qui glisse à travers un statif en forme d'anneau. Celui-ci contient un couple tube à rayons X – détecteurs numériques (organisé en « barettes ») qui tourne autour du patient, au niveau de

la zone à explorer. Il est très utilisé en routine clinique et en recherche pour l'exploration de la quasi-totalité des organes du corps humain.

Le scanner a l'avantage, avec l'évolution des technologies, de pouvoir faire bénéficier très rapidement d'une image du corps humain. Ainsi, la totalité du corps peut être visualisé en moins de 30 secondes avec les appareils actuels. Une injection de produit de contraste iodé en intraveineux permet une meilleure visualisation des vaisseaux et des différents parenchymes en fonction du temps entre cette injection et l'acquisition des images. Plusieurs acquisitions peuvent donc être nécessaires si plusieurs structures d'intérêt sont à explorer.

L'inconvénient principal du scanner est l'irradiation compte-tenu de l'utilisation des rayons X. Ainsi, cela restreint son utilisation, car la dose de rayons X délivré au tissu se cumule avec les acquisitions, exposant notamment à des risques à court terme, appelés risque déterministes, avec notamment un risque de brûlures ; mais aussi des risques sur du long terme, aussi appelé risques stochastiques, avec notamment l'apparition de cancer. La dose de rayons X délivrés doit être particulièrement maîtrisés et indiqués dans certaines situations, comme chez les femmes enceintes, les enfants, ou dans certains tissus comme notamment les organes reproducteurs.

L'analyse des images de scanner est faite en échelle de gris, traduisant l'absorption des rayons X selon la densité des tissus. L'échelle de Hounsfield est une échelle quantitative traduisant la radiodensité. L'eau est défini à 0 Unité Hounsfield (UH), l'air à -1000 UH. Les densités des tissus sont assez proches, entre 10 et 60 UH. Le muscle est par exemple situé entre 10 et 40UH, en fonction de composition en eau et en graisse. L'œil humain étant capable de déceler entre environ 200 et 250 niveaux de gris, l'estimation des UH peut être réalisé par l'œil entraîné.

c - Exploration des ischio-jambiers par radiographie et scanner

Le scanner permet une certaine analyse du muscle (Brandser et al. 1995; Linklater et al. 2010). Ainsi, les coupes réalisées sont fines et permettent une analyse tridimensionnelle intéressante. Une analyse de la trophicité d'une mesure est quantifiable de manière subjective par le radiologue ou objectif (mesure ou estimation du volume musculaire). Il est de plus

possible d'avoir une certaine estimation de la composante grasseuse d'un muscle, aussi de manière subjective « à l'œil » du radiologue ou objective avec la mesure des UH.

L'analyse des lésions musculo-tendineuses est difficile au scanner (Brandser et al. 1995). Cela est lié à la faible différence d'UH entre le muscle et l'infiltration et/ou l'hématome produit par la lésion. Une infiltration périmusculaire peut être décelée si elle est très étendue, mais il est très difficile de mettre en évidence une infiltration intra musculaire, ou entre deux chefs musculaires. En cas de rupture tendineuse ou tendino-musculaire, une rétraction du muscle peut être visualisé, notamment en comparaison avec le côté controlatéral. La radiographie et le scanner étant d'excellents examens pour l'analyse des structures osseuses, une avulsion osseuse en lien avec la blessure peut être facilement décelée, mais ces blessures avec avulsion osseuse de l'enthèse sont rares, notamment dans les ischio-jambiers.

Ainsi, même le scanner peut donner des informations directes ou indirectes sur une lésion des ischio-jambiers, celui-ci n'est pas utilisé en pratique courante, à la fois devant le manque de spécificité des informations données par le scanner, et par le caractère irradiant de cet examen. La radiographie, quant à elle, ne trouve son intérêt dans les lésions des ischio-jambiers uniquement dans l'exploration d'une avulsion de l'enthèse, rare cas de figure où le scanner lui est préféré.

4- Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)

a - IRM : principes généraux

L'IRM est un examen en coupe, non irradiant, non invasif et non douloureux, qui utilise les propriétés magnétiques de l'atome d'hydrogène, qui est contenu à des degrés variables dans le corps humain (Gibby 2005).

Le patient est placé dans un tunnel, où il existe un champ magnétique, appelé B₀, à l'origine d'un grand « vecteur d'aimantation ». Les spins correspondent à une "mini-aimantation" de chaque nucléon, animé d'un mouvement de rotation axiale qui crée autour de lui un petit champ magnétique. Il existe une champ magnétique B₀, c'est-à-dire une aimantation résultant de la différence de populations de spins en faveur du sens de B₀ (spins "parallèles" plus nombreux que les spins "anti-parallèles". Les spins ont une fréquence de précession

proportionnelle à l'intensité du champ magnétique (Fréquence de Larmor). Une onde de radiofréquence (RF) est émise pour provoquer un transfert d'énergie à l'origine d'une bascule de l'aimantation tissulaire : l'aimantation globale va alors changer de direction (vecteur). Le phénomène de relaxation traduit le retour à l'équilibre de l'aimantation tissulaire.

Le changement de l'aimantation tissulaire se décompose en deux composantes vectorielles: en une repousse de l'aimantation longitudinale, dans l'axe du champ B_0 , qui suit une courbe exponentielle que l'on caractérise par le temps T_1 , et une chute de l'aimantation transversale, liée au déphasage des spins, qui suit une courbe exponentielle décroissante caractérisée par le temps T_2 . Pour analyser ces temps T_1 et T_2 dans l'espace pour chaque voxel, le codage spatial de l'image IRM va être réalisé à l'aide de gradients qui vont permettre de coder sous forme fréquentielle la position des voxels (fréquences spatiales). Ces données fréquentielles sont stockées dans « l'espace K », aussi appelé espace de Fourier. Le remplissage de l'espace K est effectué de telle manière à ce qu'il corresponde à un plan de Fourier. La transformée de Fourier 2D inverse permet de convertir ces données fréquentielles en informations spatiales pour donner une image interprétable.

Les variations de l'aimantation transversale sont enregistrées sous forme d'un signal radiofréquence par les antennes de l'IRM. Ainsi, une impulsion RF de 90° permet d'enregistrer un signal sinusoïdal d'intensité décroissante. L'impulsion RF de 180° permet d'annuler le déphasage lié aux inhomogénéités de champ constantes de B_0 , pour ne conserver que celui dépendant des caractéristiques du tissu. La séquence Spin Echo comprend une impulsion RF de 90° puis une impulsion RF de 180° . La mesure du signal se fait au temps TE (Temps d'Echo), qui correspond au moment où les spins seront rephasés et où le signal de l'écho sera maximal, d'amplitude dépendant du T_2 . Le délai entre les 2 impulsions est $TE/2$. Ce cycle élémentaire, qui débute par l'impulsion RF de 90° , doit être répété autant de fois que l'image compte de lignes. Le temps de répétition (TR) est le temps entre chaque cycle (délai entre chaque impulsion de 90°). Pendant la décroissance (ou relaxation) de l'aimantation transversale, qui produit le signal mesuré, il y a simultanément le phénomène de relaxation longitudinale : la repousse longitudinale est d'autant plus importante que le TR est long. En écho de spin, le TR agit sur la pondération T_1 et plus il est long, plus l'image est pondérée T_1 . Le TE agit sur la pondération T_2 et plus il est court, plus l'image est pondérée T_2 . Un TR court et un TE court donnent une image pondérée T_1 . Un TR long et un TE long donnent une image pondérée T_2 .

Un TR long et un TE court pondèrent en densité de proton (DP ou rho). Ces paramètres vont ainsi être analysés visuellement, sous format d'images composées de pixels à l'écran en différents de gris, pour chaque point de l'espace analysé par la séquence IRM. En fonction de la composition du tissu analysé en IRM, l'image va apparaître en hypersignal (blanc à l'écran), ou en hyposignal (noir à l'écran) sur chacune des séquences IRM.

Inventée il y a quelques années puis récemment développé, et désormais largement utilisée en pratique clinique quotidienne, la séquence de Dixon (du nom de son inventeur W.T. Dixon), est une séquence IRM exploitant le déplacement chimique entre eau et graisse pour effacer le signal de l'un ou l'autre de ces tissus. Les fréquences de résonance des protons de l'eau et de la graisse sont légèrement différentes de sorte que ces deux tissus sont périodiquement déphasés l'un par rapport à l'autre (toutes les 2,4 ms à 1,5 T). La séquence Dixon consiste à faire deux acquisitions en écho de spin : la première, classique, pour laquelle les protons de l'eau et de la graisse sont en phase; la deuxième dans laquelle l'impulsion de 180° est légèrement décalée de façon à ce que le maximum du signal survienne 2,4 ms plus tôt, on obtient ainsi un deuxième signal pour lequel les protons de l'eau et de la graisse sont déphasés. Par addition des deux signaux, on ne visualise que celui de l'eau et par soustraction on efface le signal de l'eau au profit de celui de la graisse. Le signal est ainsi mesuré à différents moments : le premier correspond au moment où les protons sont en phase, dits "in-phase" et un second à celui où ces derniers sont complètement déphasés et dits "out of phase". Par un calcul mathématique deux autres contrastes seront également obtenus lors de la même acquisition : un premier signal dit "Water" et second dit "Fat". Les avantages de cette séquence sont sa faible susceptibilité aux inhomogénéités de champs, que ce soit sur des grands champs de vue (= effacement homogène du signal de la graisse) ou au contact du métal notamment (= faibles artéfacts de susceptibilité), son bon rapport signal sur bruit, sa capacité à proposer en un temps d'acquisition plusieurs contrastes souvent complémentaires dans l'analyse d'une lésion. En analyse musculo-squelettique (Guerini et al. 2015), la séquence la plus utilisée est l'image « Water » notamment en T2, car elle permet de remplacer le T2FatSat ou le STIR. En effet, elle permet d'obtenir une très bonne analyse des structures liquidiennes et œdémateuses, visibles en hypersignal.

En T1, elle est particulièrement utile, sans mais surtout avec injection, et permet d'avoir aussi des images de soustraction d'injection.

L'IRM est un examen qui ne nécessite pas d'injection de produit dans la grande majorité des explorations des pathologies du sportif. La qualité de l'image (résolution spatiale, rapport signal sur bruit), le nombre de séquences et de plans réalisées, vont entraîner un temps d'acquisition plus important, ce qui est en est le principal frein. En effet, le coût de l'examen est beaucoup plus élevé que pour une échographie, le « temps machine » étant donc particulièrement précieux pour cet examen. Ceci est d'autant plus vrai en recherche clinique, où la meilleure résolution spatiale est recherchée, et où un volume d'acquisition est souvent plus important et un nombre de séquences plus élevés, à l'origine d'un « temps machine » plus long. De plus, la réalisation de l'IRM est très compliquée chez les patients claustrophobes, problème fréquemment rencontré en pratique courante.

Concernant la résolution spatiale, l'image est acquise selon une certaine taille de voxel (contraction entre « volume » et « pixel », lui-même étant une contraction entre « picture et element »). Le voxel correspond à la dimension dans les trois plans du plus petit volume acquis. Ainsi, l'acquisition peut être « isométrique », c'est-à-dire que les trois dimensions du voxel sont de même taille, et l'acquisition est alors appelé « tridimensionnelle » ou « 3D ». L'acquisition peut ne pas être isométrique, c'est-à-dire qu'en général un plan est acquis avec une épaisseur de coupe plus importante : on appelle cette acquisition « bidimensionnelle » ou « 2D ». Ceci est un abus de langage, car en réalité, toute acquisition est forcément tridimensionnelle, mais on considère que c'est le nombre de plans avec une résolution spatiale importante, et rendant donc l'image analysable, qui donne le nombre de dimensions. Les séquences 3D ont par contre l'inconvénient de nécessiter plus de temps d'acquisition. Ainsi, historiquement, les séquences 2D étaient largement préférées en routine clinique. Avec l'amélioration des techniques d'acquisition et la plus grande rapidité de celles-ci, les séquences 3D sont de plus en plus souvent réalisées. Celles-ci permettent entre autres, grâce à leur résolution spatiale pouvant être très fine dans les trois dimensions (de l'ordre du millimètre dans les trois plans de l'espace), de reconstruire les structures anatomiques désirées selon leur direction, ce qui est souvent utile en imagerie ostéo-articulaire, notamment pour les structures tendino-musculaires. Elles ont aussi l'avantage de pouvoir être utilisées beaucoup plus facilement et de manière beaucoup plus fine lors des segmentations musculaires. Celles-ci sont de plus en plus souvent réalisées en pratique courante, afin d'obtenir un volume musculaire précis, mais aussi en recherche pour pouvoir établir des

segmentations non supervisées. Ainsi, les méthodes d'Intelligence Artificielle vont permettre à terme d'obtenir de manière non supervisée des paramètres quantitatifs, comme par exemple le volume musculaire.

b - Exploration des ischio-jambiers par IRM

L'un des principaux avantages de l'IRM est la très bonne analyse du tissu musculaire et des structures tendino-aponévrotiques. L'hypersignal T2 permet la détection d'une lésion même minime, à la fois en cas d'hypersignal T2 modéré « de type œdémateux/infiltratif », mais aussi en cas d'hypersignal T2 plus marqué, « de type liquidien », dans les cas d'hématome ou d'épanchement interaponévrotique (Figure 9). De plus, l'analyse du signal T1 est très informatif, avec une perte de la continuité de l'hyposignal physiologique des tendons ou aponévroses, signant leur rupture, ou au contraire un épaississement de ces structures, signant la présence d'une cicatrice fibreuse, qui peut être asymptomatique et découverte de manière fortuite, mais aussi être inflammatoire de manière aiguë (nouvelle lésion) ou chronique (lésion tendino-musculaire mal cicatrisée).

Par ailleurs, l'IRM permet l'exploration des blessures des IJ est la réalisation systématique des deux cuisses, et ceci sur l'ensemble de leur volume. Cela permet d'effectuer une analyse comparative rapide, permettant de s'affranchir des pièges (structures vasculaires mimant une lésion focale), de faire un bilan exhaustif des éventuelles cicatrices fibreuses, atrophie ou involution adipeuse sur les deux loges des IJ, mais aussi sur les autres loges musculaires des cuisses (quadriceps, adducteurs, sartorius, gracile). Cela permet aussi d'éliminer un diagnostic différentiel, comme par exemple une fracture de fatigue ou une tumeur, ou une lésion chronique des IJ avec poussée douloureuse (notamment à l'enthèse proximale à l'ischion, comme par exemple une tendinite de l'insertion du SM (Askling et al. 2008; Beltran et al. 2012b; Fletcher et al. 2021; Stępień et al. 2019)), ou une lésion traumatique d'une autre structure musculaire (quadriceps, muscles fessiers, carré fémoral, adducteurs, gracile ou sartorius), beaucoup moins fréquente que les lésions des IJ.

Sur le plan des séquences réalisées, le minimum en pratique clinique courante semble être la réalisation d'une séquence en T1 et une en T2 avec saturation de la graisse (par techniques de FatSat, Densité de Proton ou STIR par exemple).

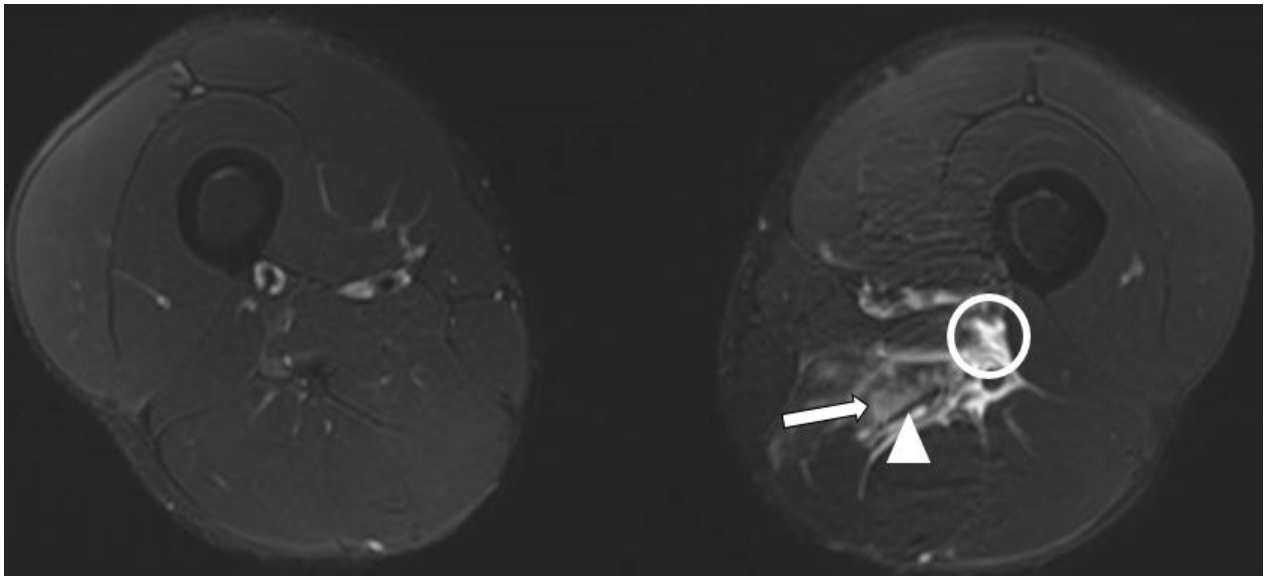


Figure 9. IRM lors d'une blessure des ischio-jambiers.

L'IRM est une coupe axiale et en séquence T2FatSat. Cette coupe réalisée à mi-cuisse permet de mettre en évidence une lésion du semi-membraneux gauche (droite de l'image) en comparaison avec le côté droit (gauche de l'image) qui est sain. Sur le plan tissulaire, la lésion concerne la jonction musculo-tendineuse (tête de flèche blanche), avec un œdème musculaire centré sur cette structure anatomique, en hypersignal modéré (« blanc » sur l'image, flèche blanche) qui est facilement décelable sur cette lésion. Cet œdème ne doit pas être confondu avec l'épanchement interaponévrotique en dehors, autour des structures vasculo-nerveuses (rond blanc), qui est en hypersignal beaucoup plus franc (signal liquidien et non œdémateux).

Le plan axial semble particulièrement indiqué pour l'exploration d'une blessure des ischio-jambiers. Idéalement, il est effectué en coupes assez fines (5mm), et couvre l'ensemble du volume musculaire des IJ, à savoir de la tubérosité ischiatique à la tête fibulaire. Par contrainte de temps, le volume exploré est réduit à la zone douloureuse, sur une ou plusieurs acquisitions. Un deuxième plan d'acquisition, en coronal ou en sagittal, permet facilement l'évaluation en hauteur des lésions et de leur localisation proximo-distale, ainsi qu'une estimation rapide du volume de la lésion, souvent réalisé en T2. Les séquences en Dixon peuvent être intéressantes sur les ischio-jambiers, car la zone à explorer est importante, et la faible susceptibilité aux inhomogénéités de champs de la séquence Dixon notamment sur les grands champs de vue est un atout important.

5- Choix entre échographie et IRM pour l'exploration des ischio-jambiers

Comme nous l'avons précédemment discuté, la radiographie et le scanner ne sont pas des examens d'imagerie de premier choix pour l'exploration des lésions musculaires, et hors cas particuliers de l'exploration d'avulsion des enthèses, il n'est pas utilisé dans ces indications.

En pratique clinique courante, l'échographie s'avère très utile sur les blessures musculotendineuses, notamment par son accessibilité, son faible coût, et sa rapidité de réalisation. Même si l'échographie est un excellent examen dans cette indication, l'atteinte musculaire et celle des fascias est analysée de manière très précise à l'IRM, ce qui permet de bien analyser les ruptures, y compris pour les structures localisées en profondeur, ce qui est parfois plus compliqué à l'échographie où l'atténuation des ultrasons rend l'analyse de l'image échographique parfois difficile dans les zones profondes (Crema et al. 2015). De plus, l'IRM permet de faire un diagnostic différentiel plus exhaustif dans les cas difficiles, en permettant entre autres une analyse osseuse et cartilagineuse, ce qui reste très partiel avec l'échographie.

En recherche, l'échographie ne semble pas être un examen adapté. Tout d'abord, l'analyse échographique des muscles ischio-jambiers est particulièrement difficile, de par leur profondeur, leur anatomie complexe, et l'important volume à explorer (Balius et al. 2019). De plus, la subjectivité inter-opérateurs est plus importante qu'à l'IRM, car en échographie, c'est l'humain lui-même qui réalise les images. En recherche, l'IRM permet la relecture des images, même multiple et répétée par une ou plusieurs personnes, permettant une analyse exhaustive des données, et une comparaison intra- mais surtout inter-opérateur. La possibilité de relire les images par une autre personne (deuxième avis, deuxième lecteur pour les protocoles de recherche) est un atout majeur. A l'échographie, cette comparaison n'est pas envisageable, car cela nécessiterait de garder le patient très longtemps pour les différentes évaluations entre les différents opérateurs. De plus, la nécessité d'avoir un temps important de récolte et d'analyse de ces données n'est pas forcément compatible avec le temps échographique et la disponibilité des patients. L'IRM, quant à elle, permet de pouvoir relire les images, de faire de nouvelles analyses, de nouvelles mesures, et ceci même à distance de la réalisation de l'examen, à condition bien sûr que toutes les acquisitions nécessaires aient bien été réalisées (type de séquences, bi ou tridimensionnelle, zone à analyser...). Elle permet aussi de pouvoir analyser et segmenter des muscles ou des lésions musculaires de manière fiable

(reconstruction tridimensionnelle pour bien suivre les fascia, etc...). L'IRM permet donc l'exploration des mesures quantitatives de manière fiable, notamment par exemple l'estimation du volume musculaire ou lésionnel.

6- Classifications IRM des lésions des muscles ischio-jambiers

Afin de pouvoir définir au mieux les blessures des IJ, les identifier facilement et d'en tirer une éventuelle valeur pronostique (Pomeranz et Heidt 1993), il a été décrit plusieurs classifications (Chan et al. 2012; Peetrans 2002; Pollock et al. 2014a). Celles-ci permettent de les caractériser au mieux, en fonction essentiellement de leur gravité et du type tissulaire atteint. Les différentes classifications utilisent l'atteinte des structures tissulaires. Une étude récente (Wangenstein et al. 2017) a exploré les principaux systèmes de classification des blessures des IJ à l'IRM, et a rapporté que les principales classifications actuellement utilisées étaient : la classification de Peetrans modifié (Peetrans 2002) (Annexe 1), la classification de Chan (Chan et al. 2012) et la British Athletics Muscle Injury Classification (BAMIC) (Pollock et al. 2014a) (Annexe 2). Elle a démontré une excellente fiabilité intra- et inter-observateur de l'utilisation de cette classification en différents grades lorsqu'ils sont évalués par des radiologues expérimentés (score inter-observateur Kappa de 0.80) (Patel et al. 2015).

La classification de Peetrans a été initialement décrite à l'échographie (Peetrans 2002), mais étendue à l'IRM, et largement retrouvée dans la littérature. Elle est simple d'utilisation. Ainsi, elle ne comporte que 4 grades de lésions :

- Grade 0 : absence de lésion à l'imagerie
- Grade 1 : présence d'œdème sans lésion architecturale des fibres
- Grade 2 : lésion architecturale partielle des fibres
- Grade 3 : rupture musculaire ou tendineuse

A ces grades vient se rajouter une lettre « c » en cas d'atteinte « conjonctive », sans rentrer dans le détail de quel type de tissu conjonctif est atteint, ni dans la taille ou la localisation de la lésion.

Une autre classification, celle de Chan (Chan et al. 2012), est aussi applicable en échographie et IRM. Ses auteurs identifient les sites anatomiques différents : intramusculaire (a), myo-fasciale (b), myo-fasciale/péri-fasciale (c), jonction myo-tendineuse (d).

Ces dernières années, une autre classification a été décrite (Pollock et al. 2014b), puis testée (Pollock et al. 2021b), et semble petit à petit s'imposer comme la plus utilisée en traumatologie du sport (Paton et al. 2023) : la British Athletic Muscle Injury Classification (BAMIC) (Figure 10). Elle est plus descriptive que la classification de Peetrons modifiée, car elle détaille la localisation tissulaire avec un suffixe (a, b ou c) pour définir le niveau lésionnel. Ainsi, le suffixe « a » fait référence à une lésion « myofasciale », le suffixe « b » à une lésion « musculotendineuse » et le suffixe « c » correspond à une « lésion intratendineuse ». Les lésions « a » touchent préférentiellement la périphérie du muscle alors que les lésions « c » ont une localisation centrale. Cette classification se compose de 5 grades (du grade 0 au grade 4) et le site lésionnel (a, b ou c) est précisé pour les grades 1 à 4.



Figure 10. Description de la British Athletic Muscle Injury Classification (BAMIC).

Les lettres « a » « b » ou « c » classent la localisation tissulaire. Le schéma est celui présenté dans l'article original de description de la BAMIC (Pollock et al. 2014b).

Ces trois classifications sont les principales utilisées pour les lésions musculaires des ischio-jambiers. L'avantage principal de la classification de la British Athletic Muscle Injury est celui d'être assez descriptif et précis, à la fois sur le grade lésionnel (de 0 à 4) mais aussi sur la localisation tissulaire (a,b,c) de l'atteinte. Toutefois, l'inconvénient est celui de compliquer la communication avec le clinicien. De plus, cela peut rendre la recherche plus complexe en fragmentant la classification en nombreux sous-types de blessures. De plus, en complexifiant la classification, on s'expose à une altération des qualités métrologiques, le risque de différence de classification entre les opérateurs étant augmenté.

7- IRM et Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui se concentre sur le développement de systèmes capables d'effectuer des tâches qui, lorsqu'elles sont réalisées par des humains, nécessitent généralement une intelligence. L'intelligence artificielle (IA) offre des opportunités significatives dans le domaine de la médecine, révolutionnant la manière dont les professionnels de la santé diagnostiquent, traitent et gèrent les soins médicaux. Il existe une certaine discordance entre la rareté de la connaissance sur le plan scientifique de l'intérêt de l'IRM dans la prise en charge de ces blessures, et les progressions constantes de l'imagerie, notamment avec l'arrivée de l'intelligence artificielle. De plus, la littérature ne traite pas encore de l'utilisation possible de l'Intelligence Artificielle à l'IRM pour les lésions des muscles ischio-jambiers. La segmentation musculaire en imagerie médicale repose sur le principe de délimiter de manière précise les contours des muscles dans des images. Cette segmentation peut être réalisée par l'IA, et dans ce cas peut être supervisée, c'est-à-dire vérifiée par l'humain, ou non. Il existe un intérêt grandissant pour la segmentation musculaire de manière non supervisée, que ce soit à partir d'images IRM ou scanner (Islam et al. 2022; Weber et al. 2019; Yang et al. 2023). Cela permet de bénéficier de manière non supervisée de données quantitatives sur les paramètres remnographiques, comme l'estimation du volume musculaire (Islam et al. 2022) ou de l'infiltration graisseuse (Weber et al. 2019), ce qui est pour le moment impossible sur les ischio-jambiers, ou du moins très long, difficile et très fastidieux (segmentation manuelle coupe par coupe et muscle par muscle). Il paraît ainsi important de connaître la fiabilité actuelle des méthodes d'estimation du volume musculaire, notamment

à partir des méthodes d'espacement des coupes avec ou sans interpolation, et des méthodes de segmentation non supervisées.

Points clés de la partie C :

- L'imagerie par IRM ou échographie permet de confirmer le diagnostic clinique de lésion musculaire des ischio-jambiers et de rechercher des signes de gravité.
- L'imagerie par Résonance Magnétique (IRM) permet un examen tridimensionnel exhaustif, reproductible, peu opérateur dépendant et permettant une relecture des images à distance de leur acquisition. L'échographie, très utile en pratique clinique courante, est moins adaptée à la recherche.
- Même si la classification de Peetrons est très souvent utilisée en pratique clinique pour grader les lésions musculaires en IRM, celle de la British Athletic Muscle Injury (BAMIC) semble progressivement s'imposer comme la référence dans les lésions musculaires des ischio-jambiers en sport.
- L'émergence des méthodes d'Intelligence Artificielle permet d'espérer de pouvoir bénéficier à terme de données quantitatives non supervisées sur les muscles ischio-jambiers.

D - Données actuelles de la littérature sur les lésions des ischio-jambiers en IRM

1- Introduction

L'IRM est désormais un examen d'imagerie utilisé en pratique courante en clinique, dans l'exploration de la quasi-totalité des organes du corps humain et dans de très nombreuses indications. Toutefois, son développement date seulement d'une trentaine d'années, depuis les débuts de l'utilisation clinique de l'IRM. Les premiers articles sur l'analyse IRM des lésions des ischio-jambiers datent des années 90, peu de temps après l'utilisation de l'IRM en pratique courante (Fried et Lloyd 1992; Pomeranz et Heidt 1993; Speer, Lohnes, et Garrett 1993). Depuis, l'intérêt et la place de l'imagerie dans les lésions musculaires des ischio-jambiers n'a cessé d'augmenter mais aussi de faire débat, que ce soit sur le plan diagnostique que pronostique. Pourtant, la fréquence des lésions musculaires des ischio-jambiers, notamment dans les sports de vitesse et d'accélération, ne cesse d'augmenter (Ekstrand et al. 2021a; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016), et la part des lésions musculaires et particulièrement celle des ischio-jambiers dans les blessures des sportifs de haut niveau continue de s'accroître elle aussi (Ekstrand et al. 2022).

2- Intérêt de l'IRM dans l'évaluation pronostique des lésions des ischio-jambiers

Le pronostic se définit comme la prévision faite par le médecin sur l'évolution et l'aboutissement d'une maladie (Dictionnaire Larousse). Dans le cadre d'une lésion musculaire, il s'agit du temps de convalescence (temps de retour à la pratique sportive) et le risque de récurrence. Le pronostic est donc établi après le diagnostic. Nous avons déjà discuté plus haut de l'intérêt de l'imagerie dans le diagnostic différentiel d'une blessure des IJ, qui n'est pas toujours si évident cliniquement. Ainsi, une blessure postérieure sur le long adducteur, postérieure et latérale sur les quadriceps (chef vaste latéral notamment), ou basse située sur les muscles fessiers, peut facilement mimer une lésion des muscles ischio-jambiers. Cet aspect de l'intérêt de l'imagerie est très important car la prise en charge d'une lésion musculaire des

adducteurs, des fessiers ou du quadriceps est complètement différente de celle des ischio-jambiers (Figure 11).

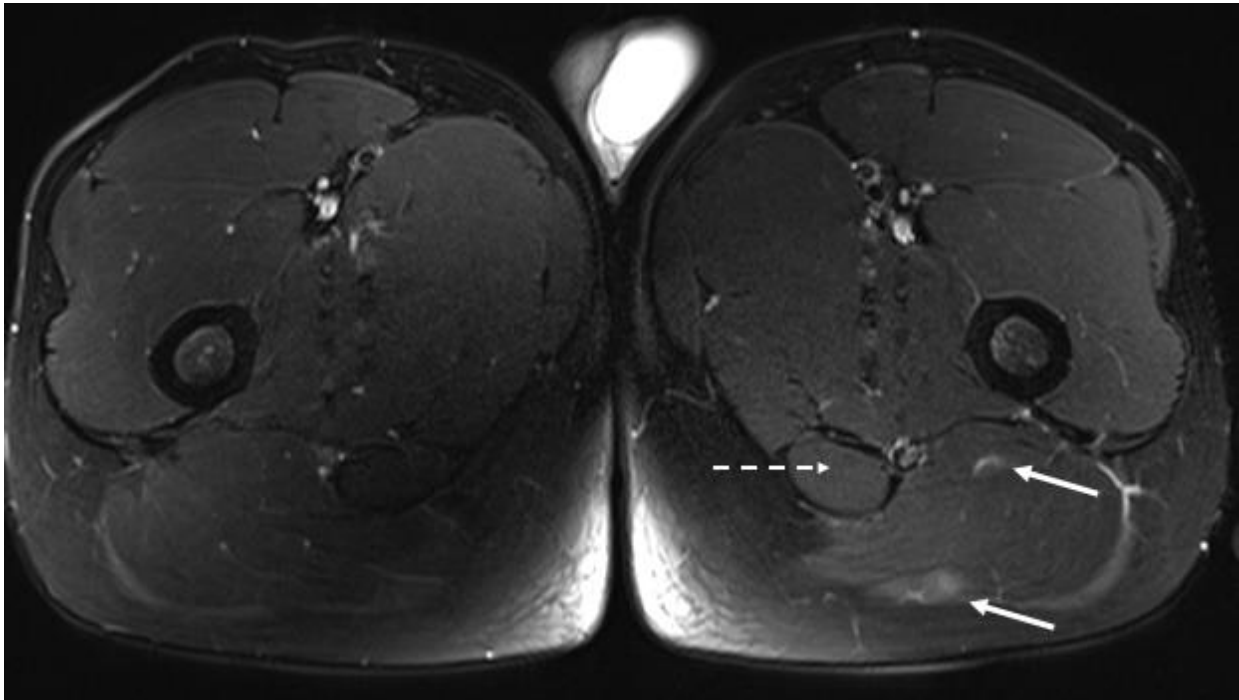


Figure 11. Diagnostic différentiel d'une blessure des ischio-jambiers.

IRM en séquence T2FatSat, coupe axiale. L'interrogatoire et l'examen clinique étaient évocateurs d'une lésion des IJ. L'IRM a permis de redresser le diagnostic en mettant en évidence deux lésions musculaires pures au sein du muscle grand fessier gauche, sans atteinte tendineuse ou aponévrotique, ni hématome (flèches continues). Les IJ étaient intègres (flèche discontinue).

A part le diagnostic différentiel, sur le plan de l'imagerie comme sur le plan clinique, les points importants sont de pouvoir repérer les facteurs de mauvais pronostic imposant un temps de retour au sport élevé. Dès les premiers articles associant lésions des ischio-jambiers et IRM, la notion de facteur pronostic apparaît rapidement. Dès 1990 dans la revue *Radiology*, Pomeranz (Pomeranz et Heidt 1993) décrit que « la prédiction de l'intervalle de convalescence pour les athlètes de haut niveau souffrant d'une lésion complète des ischio-jambiers peut être réalisée grâce à l'imagerie par résonance magnétique ». Toutefois, cela a largement été discuté et remis en question par la suite, et les facteurs pronostiques sont encore très débattus en imagerie (Crema et al. 2015; G. Reurink, Whiteley, et Tol 2015). Une étude récente a exploré le retour au sport en fonction des données cliniques et en imagerie (Wangenstein et al. 2018), et conclut que l'implication des données IRM est très faible dans la prédiction du

temps de retour au sport. Un autre article (Pollock et al. 2016a) retient comme unique facteur pronostique à l'IRM la présence d'une atteinte d'une composante conjonctive (tendineuse ou aponévrotique, noté « c ») : la présence d'une atteinte de type « c » était à l'origine d'un risque de récurrence plus élevé et de temps de retour au sport augmenté. D'autres études ont retrouvé une association entre le volume (van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018; Pollock et al. 2014b), la longueur initiale de la lésion musculaire et une lésion de grade 1 (Rubin 2012) selon la classification de Peetrons et le risque de récurrence.

Toutefois, le temps et la place de l'imagerie au moment du retour au sport ne semble pas être un élément admis de manière consensuelle. Ainsi, un article, à travers un questionnaire mondialement distribué à 131 équipes de première division de football (soccer), a permis de montrer que seulement 1 à 2% des staffs médicaux de ces équipes se basaient au moins en partie sur l'imagerie médicale et le temps comme critères importants de retour au sport (Dunlop et al. 2020). Certains auteurs retiennent toutefois le temps comme l'élément le plus important pour déterminer le délai de retour sur le terrain (Delvaux et al. 2014). Il apparaît toutefois que la disparition de la douleur n'est pas synonyme de cicatrisation. Ainsi, un travail sur 25 sujets ayant bénéficié d'une IRM avant et après la période de repos, montrait qu'ils n'avaient pas tous cicatrisé à l'IRM, alors qu'ils étaient tous asymptomatiques (Silder et al. 2013). Par ailleurs, des études antérieures ont montré que les paramètres de récupération, mesurés lors d'un examen physique, ne représentent pas une guérison musculaire complète évaluée par IRM, ce qui permet de supposer que la récupération fonctionnelle de l'athlète précède la récupération structurelle du tissu lésé (Flores et al. 2018). Cela est assez cohérent, même au-delà des problèmes musculaires, les signes inflammatoires à l'IRM ont globalement tendance à persister au-delà des symptômes. L'IRM pourrait ainsi tout à fait s'envisager comme un examen utile dans le diagnostic initial d'une lésion des ischio-jambiers, mais pas forcément dans le suivi.

Indépendamment de l'IRM, un concept récent propose un retour au sport après respect du temps de cicatrisation naturelle, c'est-à-dire au moins 4 semaines, avant de réévaluer le patient pour proposer ou non un retour au sport ou une prolongation du temps de repos. Ceci va complètement à l'encontre des principales recommandations qui suggèrent un repos de 11 à 25 jours pour les grades 1 ou 2 (Pieters et al. 2021).

3- Hétérogénéité de la littérature

Il semble de plus exister une certaine hétérogénéité dans la littérature sur les données recueillies à partir des images IRM. Il semble aussi que les informations tirées de l'IRM soient encore très largement perfectibles, à la fois en termes d'exhaustivité mais aussi en termes d'homogénéité. Par exemple, il semblerait que l'atteinte des structures tendino-musculaires, l'étendue de la zone atteinte, la totalité des muscles concernés par la lésion, ne soient pas notifiés de manière systématique dans les études. Par ailleurs, des classifications ne sont pas toujours utilisées, et quand elles le sont, ce ne sont pas toujours les mêmes. Ainsi, plusieurs classifications différentes sont utilisées pour tenter de grader les lésions (Chan et al. 2012; Paton et al. 2023; Peetrons 2002a; Pollock et al. 2014b, 2021) sans qu'une ne fasse consensus ou soit la classification de référence. De plus, la littérature reste encore peu étoffée sur le sujet, ceci est notamment lié au fait que certaines classifications n'ont été décrites que très récemment (Pollock et al. 2014b). L'utilisation de classifications est très utile dans le domaine de la recherche, car elle permet de catégoriser les lésions afin de réaliser des comparaisons entre différents critères, comme par exemple un grade lésionnel à l'IRM et un critère clinique comme la récurrence lésionnelle. L'utilisation de classifications différentes rend difficilement la comparaison des résultats de différentes études et la généralisation des conclusions des travaux de recherche.

4- Plusieurs lésions des muscles ischio-jambiers

Par ailleurs, les lésions musculaires des ischio-jambiers a été longtemps considéré comme une seule et même lésion. Récemment, plusieurs travaux (Askling et al. 2007a, 2007b) tentent de différencier plusieurs types de lésions au sein même de « la lésion » des ischio-jambiers. Cette différenciation se fait en fonction de différents paramètres. Tout d'abord, le mécanisme lésionnel semble être à l'origine de lésions différentes, en fonction qu'il s'agisse d'un mécanisme de sprint (Askling et al. 2007a, 2014) ou d'étirement (Askling et al. 2007b). Ainsi, le semi-membraneux semble être plus associé à un mécanisme d'étirement, et semble surtout atteint dans la partie proximale, alors que le chef long du Biceps Fémoral semble plus souvent

concerné lors d'un mécanisme de sprint. Par ailleurs, sur le plan tissulaire, il a été opposé les lésions avec ou sans atteinte des zones conjonctives (tendon et fascia). Ainsi, comme déjà discuté plus haut, (Pollock et al. 2016a), il semblerait que l'atteinte conjonctive soit à l'origine d'un risque de récurrence plus élevé et de temps de retour au sport augmenté. Il a peu été étudié, au sein même des lésions des ischio-jambiers, les différences en terme de tailles des lésions (Rubin 2012) ou de leur localisation proximo-distale (Beltran et al. 2012b; Fletcher et al. 2021).

5- Conclusion

Même si la blessure des ischio-jambiers est un problème majeur dans les sports de vitesse, et malgré une implication majeure de tous les intervenants dans la prévention et la prise en charge de ces blessures, son incidence continue d'augmenter (Ekstrand et al. 2022). L'une des explications pourrait être que ces mesures n'ont pas été suffisamment axées sur les particularités du groupe musculaire. Par conséquent, la "lésion des ischio-jambiers" n'apparaît pas comme une lésion unique, mais plutôt comme un terme générique englobant plusieurs sous-types de lésions résultant de la combinaison d'un muscle spécifique, d'une localisation particulière, d'un tissu donné, et nécessitant des prises en charge diagnostiques et thérapeutiques différentes. Ainsi, chaque sous-type de lésion des ischio-jambiers pourrait être assez spécifique et pourrait nécessiter son propre traitement, sa propre prévention, sa propre rééducation. Ceci suggère ainsi la nécessité d'un diagnostic clair et détaillé du potentiel sous-type de lésion des ischio-jambiers, comprenant au moins le tissu concerné et l'extension de l'atteinte (Macdonald et al. 2019; Pollock et al. 2014b, 2021). Le tissu impliqué pourrait jouer un rôle dans le processus de cicatrisation de la blessure et, par conséquent, dans la durée de la perte de temps dans le sport ou la récurrence de la blessure (Pollock et al. 2016b). Par ailleurs, l'étendue de la blessure (surface, volume, hauteur) pourrait également être une caractéristique pertinente de la blessure.

Points clés de la partie D :

- Etablir le pronostic d'une lésion des ischio-jambiers est très difficile, et reste un élément essentiel de la prise en charge, compte-tenu notamment du haut risque de rupture itérative, notamment précocement après la première lésion musculaire.
- Réaliser une nouvelle IRM, à distance de la lésion musculaire, ne semble pas avoir de place dans la prise en charge pronostique de la lésion musculaire.
- La littérature est très controversée quant à la valeur pronostique de l'IRM réalisée au moment de la lésion musculaire, pour aider à évaluer le temps de retour au sport et le risque de récurrence.

E - Mesures d'évaluation de la qualité des segmentations musculaires

Afin d'obtenir des données quantitatives telles que le volume musculaire ou le degré d'infiltration graisseuse dans un muscle, il est nécessaire d'obtenir des segmentations musculaires (Fukunaga et al. 2001; Vivodtzev et al. 2018). Il existe différentes métriques afin de comparer deux segmentations entre elles, avec chacune leurs qualités et leurs défauts.

1- Dice coefficient

Le DICE est une mesure statistique du chevauchement entre deux segmentations. Le score obtenu est compris entre 0 et 1, sans unité. Plus le coefficient DICE est élevé, plus les deux segmentations sont similaires. Les segmentations superposables ont un DICE=1. Soit R et S les deux délimitations comparées, et T la zone de chevauchement entre les deux délimitations : $DICE = 2T / (R+S)$.

Dans le cas où l'on considère deux délimitations à comparer avec pour chaque délimitation plusieurs coupes (3D), le score DICE global, dans ce cas noté DSC (Dice Similarity Coefficient), est la valeur moyenne des scores DICE individuels de chaque coupe.

Les avantages de cette métrique sont de pouvoir être utilisée à la fois en 2D et en 3D, et de donner une représentation globale de la qualité de la segmentation. Elle ne donne par contre pas la notion d'écart maximal entre deux segmentations.

2- HD : Hausdorff Distance

Une autre métrique utilisable est la Hausdorff Distance, correspondant à l'écart maximal entre les limites de deux délimitations.

Le HD est compris entre 0 et infini, et s'exprime en unité de distance, en général en mm. HD=0 en cas de segmentations superposables. Le HD est possible en 2D et en 3D (en 3D on ne garde que la distance maximale sur l'ensemble du volume de coupes).

Les avantages de cette métrique sont de pouvoir être utilisée à la fois en 2D et en 3D, et de donner la notion d'écart maximal entre deux segmentations, permet une relative complémentarité avec le DICE/DSC. L'inconvénient de la HD est qu'elle ne représente que l'erreur maximale et non pas l'ensemble de la délimitation.

3- AHD/MAD : Average Hausdorff Distance / Mean Absolute Distance

Une autre possibilité d'utiliser la distance maximale est la Average Hausdorff Distance / Mean Absolute Distance. Cette métrique représente la moyenne de distance entre chaque point d'une segmentation vers la surface de la référence et l'inverse. AHD/MAD compris entre 0 et infini, et s'exprime en unité de distance, en général en mm. AHD/MAD=0 en cas de segmentations superposables.

L'avantage de la AHD/MAD est son utilisation possible en 2D et en 3D (en 3D on ne garde que la distance maximale sur l'ensemble des coupes). De plus, elle a l'avantage de donner une moyenne globale de l'écart, et non pas seulement l'écart maximale. L'inconvénient, comme pour la HD, est qu'elle ne représente que l'erreur maximale et non pas l'ensemble de la délimitation.

4- Volume Similarity

La VS (Volume Similarity) est définie par deux fois la différence de volume entre les deux délimitations comparées, divisée par la somme des deux volumes, soit $VS(R,S) = 2((R-S)/(R+S))$. Le VS peut être négatif, et est compris entre -infini et +infini. Plus le VS se rapproche de 0, plus les segmentations ont le même volume. La VS parfaite entre 2 volumes=0.

L'avantage de la VS est de donner un aperçu rapide de la comparaison des volumes. Les inconvénients sont par contre multiples. La VS n'est possible seulement en 3D car il s'agit d'un volume. La métrique VS ignore toutes les informations spatiales ; par conséquent, alors que la VS devrait être corrélée avec le score DICE, deux segmentations avec un score DICE égal à 0 (aucune correspondance entre les délimitations) peuvent avoir une VS parfaite ($VS = 0$) si elles

ont le même volume. En terme de qualité de segmentation, une VS élevée n'est favorable que si le score DICE correspondant est également relativement élevé.

5- Volume musculaire global et par chef musculaire

Afin d'explorer les différentes métriques lors d'une comparaison de deux segmentations dans un muscle à plusieurs chefs, comme c'est le cas pour les quadriceps et les ischio-jambiers, il y a deux possibilités :

- soit on considère l'ensemble des chefs délimités comme une seule et même segmentation : on fusionne les chefs musculaires avant d'appliquer les métriques. Dans ce cas, les différents chefs musculaires sont considérés comme un seul et même muscle, et on applique les métriques comme précédemment expliqué.
- soit on considère chaque chef musculaire séparément, et on calcule ainsi les métriques pour chaque chef musculaire. Dans ce cas, on calcule les métriques en 3D, en prenant la moyenne des chefs musculaires pour le DSC et la AHD, le maximum pour la HD et la moyennes des valeurs absolues pour le VS. Ces scores sont appelés « global multiclass ».

F - Méthodes non supervisées et d'espacement des coupes

1- Méthodes non supervisées

a- Présentation générale

Plusieurs méthodes sont utilisées pour réaliser des segmentations non supervisées, afin de faire la différence entre la région d'intérêt à délimiter et les structures environnantes. Nous pouvons citer les segmentations réalisées à partir des méthodes de seuillages (« thresholding » ; permettant de différencier des zones en fonction des niveaux de gris) (Guo et al. 2013), à partir de croissance de la région (« region growing » ; à partir de « points sélectionnés », les régions d'intérêts sont étendues aux points adjacents suivant des critères prédéfinis) (Padmapriya et al. 2022), à partir de modèles déformables (« deformable models » ; basé sur la forme de l'objet) (Sotiras, Davatzikos, et Paragios 2013), à partir d'un atlas « Atlas-based segmentation » (mise en correspondance d'une image de référence dont la segmentation a été vérifiée sur une nouvelle image qui doit être segmentée, ce qui permet des modifications anatomiques de très grande ou de très petite taille) (Grange et al. 2020), à partir de « classification » (chaque pixel est traité en fonction de son intensité mais aussi de sa position et de son environnement local) (Litjens et al. 2017) et de regroupement « clustering » (approche non supervisée qui permet de diviser les différentes régions sur la base de statistiques de l'ensemble de données) (Krasnov et al. 2023). Toutefois, compte tenu de la complexité de l'imagerie médicale, les méthodes de « Machine Learning » sont de plus en plus souvent utilisées (Deo 2015). Parmi ces méthodes, les méthodes de « Deep Learning » sont utilisées dans de nombreuses applications (W. Liu et al. 2017) et particulièrement efficaces en segmentation d'imagerie médicale.

Ainsi, nous avons particulièrement utilisé dans notre travail les méthodes de segmentation basées sur le deep learning et à partir d'atlas.

b- Approche de segmentation Multi-Atlas

La segmentation à partir d'atlas, ou « Atlas-based segmentation » (Wang et al. 2013; Wang et Yushkevich 2013) permet la correspondance d'une image de référence dont la segmentation a été vérifiée sur une nouvelle image qui doit être segmentée. Cela permet des modifications anatomiques de très grande ou de très petite taille. La segmentation basée sur l'atlas est une

méthode largement utilisée dans l'analyse d'images médicales (Grange et al. 2020). Elle implique l'utilisation d'un ou de plusieurs atlas pour aider à séparer les structures anatomiques dans une image médicale. Nous disposons de deux images : une image de référence (ex : IRM) et une image labellisée (segmentation réalisée par des experts médicaux). L'image de référence est enregistrée sur une nouvelle image qui doit être segmentée ; la transformation trouvée par le processus d'enregistrement est ensuite appliquée à l'image segmentée pour obtenir une nouvelle image. L'enjeu est donc de trouver la bonne formulation mathématique permettant de passer de l'image de référence (ex : IRM « a ») à l'image qu'on souhaite segmenter (ex : IRM « b »). Cette même transformation mathématique sera appliquée à l'image labellisée « a » pour obtenir de manière non supervisée la segmentation « b », segmentation correspondant à l'image de l'IRM « b ». Ces transformations mathématiques peuvent être « rigides » ou « linéaires » (translations et rotations), ou « non-linéaires » (expansion, réduction, déformations générales ou localisées). Afin d'améliorer la capacité de cette méthode, une approche consiste à utiliser plusieurs atlas pour représenter une plus grande diversité anatomique. Ainsi, à partir de plusieurs atlas, deux techniques sont utilisées : soit on utilise uniquement l'atlas le plus « ressemblant » à l'image qu'on doit segmenter (exemple : utiliser un atlas de segmentation de quadriceps chez des sujets jeunes pour segmenter une IRM chez un sujet jeune et en bonne santé, plutôt que d'utiliser un atlas établi chez des sujets âgés ou malades), soit on utilise une fusion des segmentations obtenues avec les différents atlas. Dans ce dernier cas, l'étape primordiale est la fusion des segmentations élaborées, et est en générale établie par la méthode du « vote majoritaire » entre les différentes segmentations (pixels considéré ou non dans la délimitation) mais expose au risque d'une certaine imprécision compte tenu de l'absence de considération des pixels de voisinage. Ainsi, afin d'affiner la méthode multi-atlas, des systèmes de pondération locale ont été utilisés, permettant de privilégier la segmentation la plus proche dans une région donnée. Malheureusement, les poids distribués indépendamment ne tiennent pas compte des erreurs produites par la corrélation des atlas. Il a ainsi été créée la méthode de Joint Label Fusion « JLF » ou méthode de fusion de étiquettes) (Wang et al. 2013) prenant en compte la corrélation structurelle entre les atlas pour minimiser l'erreur. Elle utilise ainsi à la fois la localisation spatiale mais aussi le niveau de gris. Elle permet d'obtenir un degré de probabilité pour considérer ou non un pixel comme étant situé au sein de l'image à segmenter. La principale

différence entre JLF et les autres méthodes de fusion est que JLF considère la corrélation entre les atlas quand il estime la pondération spatiale.

Une étape supplémentaire, optionnelle, nommée « CL » (« correction by automatic learning ») (Wang et Yushkevich 2013), permet de détecter et de corriger une erreur systématique réalisée par un algorithme de segmentation non supervisée. La source de cette erreur peut varier, et il peut s'agir par exemple d'une discontinuité sur les segmentations manuelles sur lesquelles l'algorithme se base. La CL nécessite une étape d'entraînement. Cela permet de produire, pour chaque modèle et chaque pixel, un modèle de correction. Chaque atlas est préalablement segmenté par le JLF comme s'il s'agissait d'une image à segmenter. Cependant, le JLF ne s'appuiera que sur les autres atlas disponibles pour effectuer cette segmentation. Puisque la segmentation experte est disponible pour l'atlas testé, il sera possible de déterminer les erreurs commises par le JLF. L'application de cette méthode à tous les atlas permet de construire une base de données pour apprendre les erreurs systématiques commises par JLF et permet ainsi d'établir un modèle de correction. Lors de la correction d'une nouvelle image, chaque pixel, préalablement étiqueté par le JLF, sera testé en utilisant la même définition et les mêmes caractéristiques de la zone de travail. Le pixel sera réattribué à l'étiquette dont le modèle de correction a donné la plus grande confiance.

c- Méthode d'apprentissage profond ou Deep Learning

La figure 12 représente la taxonomie de l'Intelligence Artificielle. Le Machine Learning est un ensemble de techniques donnant la capacité aux machines d'apprendre automatiquement un ensemble de règles à partir de données, contrairement à la programmation qui consiste en l'exécution de règles prédéterminées. Le Deep Learning (ou apprentissage profond) (Alzubaidi et al. 2021) est une technique de Machine Learning récente, et de développement croissant, avec constamment de nouvelles avancées techniques (Alom et al. 2019). Elle repose sur le modèle des réseaux de neurones : des dizaines voire des centaines de couches de neurones sont empilées pour apporter une plus grande complexité à l'établissement des règles.

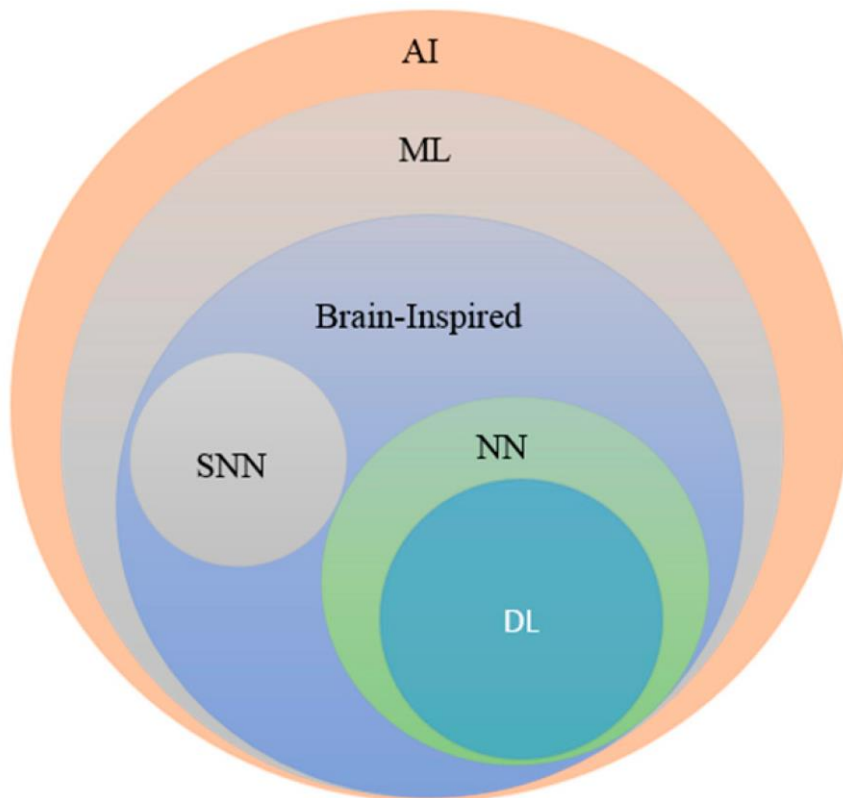


Figure 12. Représentation of AI.

Un exemple de représentation de la taxonomie de l'IA (Alom et al. 2019). AI: Artificial Intelligence; ML: Machine Learning; NN: Neural Networks; DL: Deep Learning; SNN: Spiking Neural Networks.

Les réseaux neuronaux convolutionnels (« Convolutional Neural Networks ») consistent en trois étapes de traitement successif, à savoir une convolution, une fonction d'activation (classification binaire) puis une fonction de mise en commun (sous-échantillonnage) des images. Parmi ces méthodes, celle de « l'architecture en U » (« U-Net architecture »)(Zunair et Ben Hamza 2021) est un des modèles de réseaux neuronaux convolutionnels les plus populaires pour la segmentation d'images médicales. Ce modèle est basé sur un système « d'encodage-décodage » à plusieurs niveaux, d'où la forme de « U ». L'encodage permet de compresser les données visuelles et sémantiques, alors que le décodage permet de reconstruire progressivement les cartes de caractéristiques jusqu'à la résolution initiale. Il existe des sauts de connexion (« skip connections ») à chaque résolution, qui permettent de transmettre les caractéristiques spatiales du bloc d'encodage au bloc de décodage, permettant d'améliorer la localisation. Différents types d'amélioration de ce modèle ont été décrits.

2- Espacement des coupes : méthodes et problématiques

La segmentation de toutes les coupes d'un muscle est considérée comme la méthode de référence pour obtenir le volume musculaire, mais c'est une étape chronophage et fastidieuse. Afin d'estimer le volume musculaire de manière plus rapide, des méthodes d'espacement des coupes sont utilisées dans la littérature. Elles permettent d'obtenir une estimation du volume musculaire à partir d'un nombre restreint de coupes, permettant de drastiquement réduire le temps nécessaire à la délimitation.

On peut globalement séparer ces méthodes en deux types distincts pour estimer le volume musculaire :

- Celles utilisant l'espacement des coupes mais sans méthode d'interpolations complémentaires. Ainsi, une coupe ou un certain nombre de coupes sont délimitées, puis le volume musculaire est estimé directement à partir de ces coupes, par une des méthodes d'approximation (Franchi et al. 2014; Nordez et al. 2009; Pons et al. 2018). Les coupes sélectionnées sont soit choisies de manière précise, soit unique (par exemple la coupe centrale à 50% du muscle), soit multiple (par exemple 3 coupes « 40/50/60% » de la hauteur du muscle), ou à partir d'un espacement défini entre 2 coupes (par exemple une coupe tous les centimètres) ou à partir d'un échantillonnage de coupes prédéfini (exemple : 1 coupe sur 10) ; ces deux dernières méthodes peuvent correspondre en fonction de l'espacement des coupes (exemple : une coupe sur 10 sur une acquisition millimétrique correspond à un délimiter qu'une coupe tous les centimètres).

Parfois, cette estimation s'appuie sur la mesure de la longueur du fémur, mesure directement ou estimée en fonction de la taille (Yamauchi, Kato, et Kato 2019).

- Celles utilisant une méthode d'interpolation. Ainsi, cette méthode peut être considérée comme une méthode semi-supervisée, associant une étape humaine première, puis une méthode informatisée d'interpolation entre les coupes sans vérification ultérieure par l'humain. L'espacement des coupes sélectionné au préalable peut varier de la même manière que celles sans interpolation.

La délimitation de coupes de manière espacée peut faire évoquer la difficulté de devoir délimiter le muscle de manière discontinue, sans prise en compte du volume de manière

global. Toutefois, la délimitation de coupes espacées ne contre-indique pas de prendre en considération l'intégralité du muscle lors de la délimitation, en faisant par exemple défiler l'ensemble des coupes notamment entre deux images à délimiter, mais aussi d'avoir une approche multiplanaire et tridimensionnelle afin de mieux appréhender chaque chef musculaire sur le plan du volume complet. Ainsi, les coupes segmentées sont aussi pertinentes que celles qu'on aurait obtenues au décours d'une délimitation de l'ensemble des coupes.

Chapitre III-Problématique, hypothèses et objectifs

A - Problématique

La prévalence, l'incidence et l'impact des lésions musculaires des ischio-jambiers restent toujours très importants, et n'a pas diminué avec le temps (Ekstrand et al. 2021b, 2022; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016). Les données anatomiques et notamment les localisations des lésions musculaires en IRM semblent mal codifiées et encore décrites de manière hétérogène. De plus, il semble que les "lésions musculaires des ischio-jambiers" soient encore considérées comme une seule et même entité, sans que la littérature n'ait cherchée à détailler chaque sous-type de lésion, à la fois sur le plan diagnostique (localisation de l'atteinte, taille de la lésion, données cliniques, mécanismes lésionnels...), mais aussi sur le plan de la prévention des récurrences et de la rééducation.

Parallèlement, l'estimation du volume musculaire est un paramètre de grand intérêt que ce soit en clinique ou en recherche. Les études ont utilisé des méthodes d'espacement des coupes, avec ou sans interpolation, dont la fiabilité est mal connue. De plus, les muscles des cuisses n'ont pas encore bénéficié du développement récent des méthodes de segmentations non supervisées grâce aux différentes méthodes d'Intelligence Artificielle, méthodes en cours de développement et en constante progression. Ces méthodes nécessitent une évaluation de leur fiabilité de segmentation, afin de rechercher des erreurs systématiques, de pouvoir les perfectionner et de les utiliser avec une précision connue au préalable. Il est ainsi difficile de pouvoir utiliser en recherche ou en pratique clinique courante des données quantitatives sans avoir une idée de leur fiabilité. Pour plusieurs raisons préalablement discutées, il nous a paru indispensable d'utiliser l'Imagerie par Résonance Magnétique dans notre travail.

B - Hypothèse

Notre première hypothèse était que les données anatomiques, et notamment les localisations remnographiques précises des lésions musculaires des ischio-jambiers, seraient encore mal

décrites, mal résumées, non explorées de manière consensuelle. Ainsi, il paraissait d'abord nécessaire de faire un état des lieux exhaustif des connaissances sur le sujet, des paramètres cliniques et remnographiques recherchés et des classifications utilisées.

Les autres hypothèses étaient que les lésions musculaires des muscles ischio-jambiers, historiquement considérée comme « unique », soient en fait composées de plusieurs sous-types, et pourraient être individualisées en fonction des corrélations entre les paramètres remnographique et :

- le mécanisme lésionnel (deuxième objectif)
- la douleur (troisième objectif)
- les risques de récurrence (quatrième objectif)

Notre cinquième hypothèse était que les avancées scientifiques actuelles permettraient la création et l'utilisation de méthodes non supervisées de segmentation musculaire des quadriceps et ischio-jambiers. Notre hypothèse était que ces méthodes non supervisées d'Intelligence Artificielle permettraient d'accéder à une estimation du volume musculaire avec une précision acceptable, et applicable dans des domaines cliniques ou de recherche. Ainsi, avec les progrès de l'imagerie et notamment avec l'arrivée de l'Intelligence Artificielle, il semble envisageable de pouvoir bénéficier à terme de données quantitatives, comme par exemple et en premier lieu le volume musculaire, à la fois en routine clinique et en recherche, de manière non supervisée, facilement et rapidement accessible.

Notre sixième hypothèse était que les méthodes d'estimation du volume musculaire utilisées dans la littérature, notamment basées à partir de segmentations espacées des coupes, avec ou sans interpolation, auraient une fiabilité perfectible.

C - Objectifs

Dans ce contexte, notre travail de thèse avait plusieurs objectifs.

Objectif 1 : déterminer l'état des connaissances sur l'exploration descriptive par IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers.

Objectif 2 : analyser les liens éventuels entre les différents types de mécanisme lésionnel clinique de la lésion musculaire des ischio-jambiers avec les données remnographiques

Objectif 3 : analyser les liens éventuels entre les données cliniques au moment de la blessure et les données remnographiques.

Objectif 4 : mettre en évidence des facteurs de risque cliniques et surtout remnographiques de récurrence de lésion des ischio-jambiers.

Objectif 5 : évaluer la fiabilité des différentes méthodes non supervisées en comparaison avec la méthode de référence (segmentations manuelles) à la fois de manière qualitative grâce aux différentes métriques disponibles pour juger de la fiabilité des délimitations, et de repérer les différents types d'erreurs, mais aussi de manière applicative sur l'estimation du volume musculaire.

Objectif 6 : tester la fiabilité des méthodes utilisées dans la littérature concernant l'estimation du volume des muscles des cuisses, à savoir établies à partir de segmentations espacées.

Chapitre IV-Contribution personnelle sur l'exploration IRM des ischio-jambiers

A - Introduction

Nous avons donc vu que les lésions des muscles ischio-jambiers étaient un problème majeur pour le sportif, et malgré les efforts mis en place par tous les intervenants, l'incidence de ces blessures ne diminuaient pas. Nous avons d'abord réalisé une revue de la littérature sur la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM, permettant de démembrer et comparer les données recueillies dans la littérature (partie B). A partir de là, il nous a paru nécessaire de mettre en place une étude prospective multicentrique, non interventionnelle, associant d'une part la réalisation d'une IRM des deux cuisses chez un patient qui présentait une suspicion clinique de lésion musculaire des ischio-jambiers et, d'autre part, le remplissage d'un auto-questionnaire par le patient (partie C). Cette cohorte, intitulée « HAMMER », acronyme de « HAMstring MEchanics and mRi », nous a permis d'étudier le lien entre la douleur et les données IRM (« HAMMER PAIN », partie D), le lien entre la localisation de la blessure à l'IRM et le mécanisme clinique de la blessure (« HAMMER HAMMER », partie E), et enfin le lien entre les données de la lésion et le risque de récurrence (« POST HAMMER », partie F). Nous avons ensuite réalisé les segmentations musculaires (partie G), puis étudié la variabilité de ces segmentations entre les experts et leur distribution spatiale (partie H). Nous avons ensuite cherché une signature morphologique pour sélectionner les atlas (partie I). Nous avons enfin testé les méthodes non supervisées et des méthodes d'espacement des coupes avec ou sans interpolation, en repérant leurs erreurs spatiales (partie K) et en testant leur fiabilité pour estimer le volume musculaire (partie L).

B - Revue de la littérature sur la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM

1- Résumé

Les lésions musculaires des ischio-jambiers ont souvent été explorées dans la littérature, mais il semble que les données remnographiques lors de ces lésions ne soient pas explorées de manière homogène et exhaustive. Il nous paraît tout d'abord primordial de faire un état des lieux des connaissances sur l'utilisation de l'IRM lors de ces lésions, des paramètres recherchés et des classifications utilisées. Ainsi, notre objectif principal était de faire un état des lieux de la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM, à la fois sur le muscle atteint, sur la structure tissulaire, la localisation proximo-distale, et sur le grade lésionnel. Notre deuxième objectif était d'explorer la fréquence des données utilisées lors des articles concernant les blessures des muscles ischio-jambiers en IRM. Nous avons ainsi utilisé 5 bases de données (Pubmed, Web of science, Scopus, Sportdiscus, Cochrane library). Une première sélection a été effectuée sur la base du titre et du résumé des articles. Lors de la deuxième sélection, le texte intégral des articles restants a été évalué pour vérifier s'il répondait aux critères d'inclusion. Le texte intégral des études, en anglais, devait être disponible. Les rapports de cas et les revues ont été exclus. Les études incluses devaient indiquer la localisation des lésions des ischio-jambiers par IRM dans les 8 jours suivant la blessure aiguë. Nous avons donc exploré 2788 références, parmi lesquelles nous avons extrait 34 articles d'intérêt que nous avons pu analyser dans le détail, rapportant un total de 2761 lésions aiguës des ischio-jambiers. Avant le début de l'étude, celle-ci a été enregistrée dans le registre prospectif international PROSPERO des revues systématiques (numéro d'enregistrement CRD42018107580). Le chef musculaire le plus souvent atteint est le chef long du biceps fémoral (70 %), suivi du semi-tendineux (15 %), généralement associé au BFLH. Le tissu le plus fréquemment touché est la jonction myotendineuse, qui représente la moitié des cas (52%). Parmi toutes les lésions, la répartition entre les lésions proximales, centrales et distales semblait homogène, avec respectivement 34,0 %, 33,4 % et 32,6 %. Le mécanisme d'étirement, bien que rapporté dans seulement 2 articles et ne représentant que 3% de tous les mécanismes rapportés, semble responsable d'une lésion spécifique impliquant le tendon proximal du semi-membraneux, et conduisant à une plus longue période d'arrêt du sport.

2- Article de revue de la littérature sur la localisation des blessures des ischio-jambiers en IRM

“Location of acute hamstring injuries based on Magnetic Resonance Imaging: a systematic review”

Running title: *MRI hamstring injury locations*

Sylvain Grange, Gustaaf Reurink, Anh Quoc Nguyen, MD, Camille Riviera-Navarro, Clément Foschia, Pierre Croisille, and Pascal Edouard

Article publié dans la revue *Sports Health*

Word count of manuscript (excluding abstract and references): 3046

Word count of the Abstract: 278

Number of references: 57

Number of Tables: 2

Number of Figures: 2

Number of supplementary data: 5

Funding: No funding.

Competing Interest: None declared.

Ethics approval: Not required.

Additional data:

Supplementary data 1: Search strategy

Supplementary data 2: Risk of bias assessment for the 34 studies included

Supplementary data 3: Dates of patient's inclusion period

Supplementary data 4: Number of articles included by category of extracted data

Supplementary data 5: Description of the main findings regarding muscle and tissue location for the two articles providing a description of these both locations

ABSTRACT

Context: Hamstring muscle injury location using Magnetic Resonance Imaging (MRI) is not so well described in the literature.

Objective: To describe the location of hamstring injuries using MRI.

Data sources: Pubmed, Web of science, Scopus, Sportdiscus, Cochrane library.

Study selection: The full text of studies, in English, had to be available. Case reports and reviews were excluded. Included studies must report the location of hamstring injuries using MRI within 8 days of the acute injury.

Study design: Systematic review.

Data Extraction: A first screening was conducted based on title and abstract of the articles. In the second screening, the full text of the remaining articles was evaluated for the fulfillment of the inclusion criteria.

Results: From the 2788 references initially found in 5 databases, we included 34 studies, reporting a total of 2761 acute hamstring injuries. The most frequent muscle head involved was the long head of the biceps femoris (BFLH) (70%), followed by the semitendinosus (ST) (15%), generally associated with BFLH. The most frequent tissue affected was the myotendinous junction (MTJ) accounting for half the cases (52%). Among all lesions, the distribution between proximal/central/distal lesions looked homogenous, with 34.0%, 33.4% and 32.6%, respectively. The stretching mechanism, while only reported in 2 articles, represented 3% of all reported mechanisms, appears responsible for a specific lesion involving the proximal tendon of the semimembranosus (SM), and leading to a longer time out from sport.

Conclusion: BFLH was the most often affected hamstring injuries and MTJ was the most affected tissue, in addition the distal/central/proximal locations were homogeneously distributed. We also noted that MRI descriptions of hamstring injuries are often poor and did not take full advantage of the MRI strengths.

Systematic review registration: Prior to study initiation, the study was registered in the PROSPERO International prospective register of systematic reviews (registration number CRD42018107580).

Keywords: Hamstring; muscle; strain; tear; location; MRI; sports injury.

1. INTRODUCTION

In high-speed running sports, hamstring muscles are the most frequently injured, leading to serious consequences for athletes (e.g. time-loss, performance decrease, recurrence, financial loss).(Edouard et al. 2021a; Edouard, Branco, et Alonso 2016a; Ekstrand et al. 2012; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016; Woods et al. 2004) Despite efforts to prevent and manage hamstring injuries,(Askling et al. 2014; Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013; Macdonald et al. 2019; Mendiguchia et al. 2017; Rettig, Meyer, et Bhadra 2013b) their incidence has not decreased.(Ekstrand et al. 2021b; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016) One explanation could be that these measures have not sufficiently focused on the particularities of the hamstring muscle group, which consists in four muscles of the posterior thigh: the biceps femoris muscle long head (BFLH), the biceps femoris muscle short head (BFSH), the semitendinosus muscle (ST), and the semimembranosus muscle (SM).(Stępień et al. 2019) These four muscles differ in their anatomy, structure and function.(Beltran et al. 2012b; Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012; Stępień et al. 2019) BFLH and SM are hemi-pennate muscles, ST has a fusiform shape and BFSH has a slanted trapezoid shape.(Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012) The fiber length per total muscle length of BFLH and SM are smaller than that of ST and BFSH.(Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012) They are biarticular; hip extensor and knee flexor muscles (except uniarticular BFSH).(Beltran et al. 2012b) Their involvement measured via electromyography or functional Magnetic Resonance Imaging differed according to different exercises and activities.(Bourne et al. 2016; Mendez-Villanueva et al. 2016) The injury locations also varied according to sports, with a reported predominance of BFLH injuries for sprinting sports (e.g. football)(Crema et al. 2016) and of SM for stretching sports (e.g. dance),(Askling et al. 2007a, 2007b) supporting the different biomechanical role of each hamstring muscle. The hamstring muscles are composed of different tissues (i.e. tendon, myotendinous junction, muscle, aponeurosis, myoaponeurosis junction) with varying degrees of resistance to breakage.(Beltran et al. 2012b) The involved tissue could play a role in the healing process of the injury, and thus in the duration of time loss in sport or injury recurrence.(Pollock et al. 2021) The different size of the injury (e.g. area, volume, height) could also be a relevant characteristic of the injury, given its influence on the healing process and time-loss duration.(Askling et al. 2007b)

Consequently, “hamstring injury” does not appear as a unique injury, but more as a generic term including several injuries resulting from the combination of a specific muscle and tissue location, which has been reported to have specific biomechanical and healing properties.(Beltran et al. 2012b; Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012; Stępień et al. 2019) Each specific hamstring injury may require its own optimal management in prevention or rehabilitation, suggesting the need for a clear and detailed hamstring injury diagnosis including at least location and tissue involved.(Macdonald et al. 2019; Pollock et al. 2021) It thus seems essential to explore further the specific hamstring injuries. Magnetic Resonance Imaging (MRI) can be used to provide an accurate and reliable description of hamstring injury location and tissue involved,(Askling et al. 2007a; Connell et al. 2004; Slavotinek, Verrall, et Fon 2002; Geoffrey M. Verrall et al. 2003; Wangensteen, Tol, et al. 2017) since MRI presents a very high sensitivity and seems not to be operator dependent.(Wangensteen, Tol, et al. 2017) A clear understanding on the different hamstring injuries would be of help to improve hamstring injury prevention and rehabilitation programs by targeting the most frequent injury locations and also the variety of hamstring injuries. Through this systematic review, we aimed to specify anatomical and tissue locations of acute hamstring injuries using early MRI to provide an in-depth analysis of hamstring injuries.

2. METHODS

Our systematic review was registered in the PROSPERO database (registration number: CRD42018107580).

The literature search was performed in March 1, 2020 in the following five databases: PubMed/MEDLINE, SPORTdiscus, Scopus, Web of Science and The Cochrane Library, to identify studies dealing with hamstring injuries using a combination of key words: injuries or its synonyms (lesion, wounds, pain, tear, damage, strain, laceration, rip, rent, split, rupture, pred, caus, risk factors) AND imaging or synonyms (MRI, Magnetic Resonance Imaging) AND

hamstring or its synonyms (hamstring muscles, posterior thigh, biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus) (keywords equations in Supplementary data 1).

Studies were included if *i)* MRI were performed within 8 days of an acute hamstring injury (we chose this delay since no changes in MRI signal have been reported within these delay, especially in edema and fiber disruption extent,(Wangenstein, Bahr, et al. 2017) and few is known about the MRI signal after 8 days (there is a risk not to detect the lesion or underestimate the lesion size given the oedema resorption); *ii)* MRI findings were used as a descriptive and/or diagnostic tool for hamstring injury; *iii)* studies reported injury location as seen on MRI; *iv)* injury mechanism was indirect; *v)* they were written in English, and *vi)* the article full text was available. Interventional studies were included, *i)* for those testing a prevention program only if the outcomes regarding the hamstring injury location seen on MRI could be extracted and for the intervention group if the MRI was performed before the intervention, and *ii)* for those with an injection we only considered the initial MRI performed after injury but before any injection. All narrative, systematic or meta-analysis reviews and case reports were excluded.

Two researchers (SG and PE) independently screened studies based on title and abstract according to the inclusion/exclusion criteria, using Covidence (<https://www.covidence.org>). Then, the same two researchers reviewed the selected full texts. Discrepancies were resolved by consensus. If no consensus could be reached, a third reviewer (GR) was available for a final decision, but this was not required. Studies referenced in the selected articles were also screened for relevant studies not already highlighted by our search.

One researcher (SG) assessed the potential risk of bias of the studies included, using the criteria of the consensus statement of Hayden *et al.*(Hayden, Côté, et Bombardier 2006) including 14 items. A score $\geq 75\%$ was required to consider a low risk of bias of the study.

One researcher (SG) extracted the following data: author and year of publication; study design; patients' follow-up; studied population (number, sex, age, sport and level, country, history of hamstring injury); MRI properties (magnetic field used, MRI sequences); number of hamstring injuries; number of injuries by location: muscle head (long or short head of the biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus), part of the muscular system affected (tendon/aponeurosis, muscle belly, myotendinous junction), proximal, central, distal or extensive (combining the three) location, as well as the classification used to describe injury location (e.g. British Athletics Muscle Injury classification(Patel et al. 2015)); number of injuries according to the grade of severity, as well as the classification used to describe injury severity (e.g. classification of Peetrons(Peetrons 2002a)); size of lesions: height, length, width, median area, average volume, distance from ischial tuberosity, average length of the tendinous lesion, percentage of tendon area affected, measure of tendinous retraction; and mechanisms of injuries. In general, the volume of the lesions was estimated by multiplying the height of the lesion by its anteroposterior diameter and by the width, dividing by two (the lesion being considered as an ellipse).(Slavotinek, Verrall, et Fon 2002)

The “primary lesion” was defined as the muscle lesion with the largest volume of injury. The “secondary lesion” was defined as the muscle lesion with the second largest volume of injury. The area involved was defined as the largest cross-sectional area of the muscle head seen on axial view. Professional athletes or those competing at national or international level were considered as “high level” while amateur, recreational athletes, or those competing at regional or lower levels of competition, were considered as “low level”.

In order to provide a synthesis of the results from included studies, a descriptive analysis was performed.

3. RESULTS

The flow chart of the selection of articles is presented in Figure 1. We included 34 articles. Their description is presented in Table 1 and a summary of their characteristics in Table 2. Regarding the risk of bias assessment, all the studies met the quality criteria (score $\geq 75\%$): one

study had a score of 79%,(De Vos et al. 2014) and the other 33 had scores of 93% or 100% (Supplementary data 2). The duration of the participants' follow-up in studies varied from 19 days to 10 years (Supplementary data 3).

Regarding MRI methodology, most MRIs were performed on 1.5 Tesla (T) units (n=28, 82.4%) or 3.0 T (n= 4, 11.8%), and two used a 1.0 T (n=2, 5.9%) magnetic field. Protocols included T2-weighted sequences with fat signal suppression obtained with spectral suppression (fat saturation (fs) pulse (n=13, 43.3%) inversion recovery (short Tau IR: STIR) (n=9, 30.0%)), or without fat signal suppression (n=7, 23.3%), Proton Density (PD) (n=11, 36.6%) and T1 (n=18, 60.0%) sequences. The sequences contained at least 2 planes per inclusion criteria in 31 articles, with a maximum of 3 for 6 articles. All the MRIs were performed within 8 days of the hamstring injury occurring, with an average of 4.3 ± 1.6 days. Of the 34 included studies, only 23 used a classification for injury location (Supplementary data 4). Six different classifications were described, such as BAMI, Chan, Peetrans, classic (rupture with more or less 50%), tear/edema/avulsion, or a new classification. Among the 23 studies (corresponding to 1822 hamstring injuries(Cohen et al. 2011; Crema, Godoy, et al. 2018; De Vos et al. 2014; Ekstrand et al. 2012; Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Gibbs et al. 2004; Hallén et Ekstrand 2014; Bruce Hamilton et al. 2018; van der Made, Almusa, Reurink, et al. 2018; van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018; Nescolarde et al. 2015; Pollock et al. 2016b; Pomeranz et Heidt 1993; Rettig, Meyer, et Bhadra 2013b; Gustaaf Reurink et al. 2014; Gustaaf Reurink, Almusa, et al. 2015; Geoffrey M. Verrall et al. 2003; Wangensteen et al. 2015, 2016; Wangensteen, Bahr, et al. 2017; Wangensteen, Tol, et al. 2017; Wangensteen et al. 2018)) using a classification for injury severity, the Peetrans' being the most frequent (65% of studies) (Table 2).

Combining all the 34 included studies, a total of 2761 hamstring injuries were reported. An overall view of the characteristics of these hamstring injuries is presented in Figure 2 and Table 2. 32 (94.1%) studies mentioned the muscle head involved, and 18 (52.9%) described the tissue location. A description of tissue location within each muscle head was given in only 2 studies (5.9% of included studies). The frequency of hamstring injuries features, ranged from 15.6 to 82.8% of the number injuries, is described in Supplementary data 4.

Combining the included studies, more than one muscle head was affected in 25.4% of the hamstring injuries. In 0.9% of the injuries, three muscle heads were affected. All the injuries (including primary and secondary lesions) were described in 20 studies, for a total of 1068 hamstring injuries:(Askling et al. 2007a, 2007b, 2014; Cohen et al. 2011; Connell et al. 2004; A. A. De Smet et Best 2000; Gibbs et al. 2004; Koulouris et al. 2007; van der Made, Almusa, Reurink, et al. 2018; Nescolarde et al. 2015; Opar et al. 2015; Pollock et al. 2016b; Rettig, Meyer, et Bhadra 2013b; Gustaaf Reurink et al. 2014; Gustaaf Reurink, Almusa, et al. 2015; Slavotinek, Verrall, et Fon 2002; Geoffrey M. Verrall et al. 2003; Wangensteen et al. 2016; Wangensteen, Bahr, et al. 2017; Wangensteen et al. 2018) BFLH represented 69.8% of total injuries, ST 15.4%, SM 13.1%, and BFSH 1.7 %. Primary lesions were described in 30 studies, for a total of 2438 hamstring injuries:(Askling et al. 2007a, 2007b, 2014; Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013; Crema et al. 2016; Crema, Godoy, et al. 2018; Crema, Jarraya, et al. 2018a; A. A. De Smet et Best 2000; De Vos et al. 2014; Ekstrand et al. 2012; Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Gibbs et al. 2004; Hallén et Ekstrand 2014; Bruce Hamilton et al. 2018; Koulouris et al. 2007; van der Made, Almusa, Reurink, et al. 2018; van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018; Nescolarde et al. 2015; Opar et al. 2015; Pollock et al. 2016b; Pomeranz et Heidt 1993; Rettig, Meyer, et Bhadra 2013b; Gustaaf Reurink et al. 2014; Gustaaf Reurink, Almusa, et al. 2015; Slavotinek, Verrall, et Fon 2002; Geoffrey M. Verrall et al. 2003; Wangensteen et al. 2015, 2016; Wangensteen, Bahr, et al. 2017; Wangensteen et al. 2018) with lesions of BFLH largely predominant (76.9%) (Figure 2 and Table 2). When two muscles were affected, BFLH (primary lesion) and ST (secondary lesion) was the most frequent combination (82.1%), others were less common (BFLH and BFSH, BFLH and SM, ST and SM, with 7.7%, 3.8% and 6.4%, respectively).

Regarding the type of tissue affected (described in 18 studies, for 1286 hamstring injuries)(Askling et al. 2007a, 2007a, 2007b, 2014; Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013; Connell et al. 2004; Crema et al. 2016; Crema, Jarraya, et al. 2018a; A. A. De Smet et Best 2000; Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Koulouris et al. 2007; Opar et al. 2015; Pollock et al. 2016b; Pomeranz et Heidt 1993; Slavotinek, Verrall, et Fon 2002; Wangensteen et al. 2016;

Wangenstein, Bahr, et al. 2017; Wangenstein, Tol, et al. 2017; Wangenstein et al. 2018)), the myotendinous junction (MTJ) was involved in more than half the cases (n=668, 51.9%) (Figure 2 and Table 2).

The proximo-central-distal location was described in only 40.6% of the studies. When considering distal and proximal locations (described in 7 studies, for 713 hamstring injuries(Askling et al. 2007a, 2008; Crema et al. 2016; A. A. De Smet et Best 2000; van der Made, Almusa, Reurink, et al. 2018; Nescolarde et al. 2015; Wangenstein et al. 2016)), the muscular lesions were mostly proximal (62.8%) (Figure 2 and Table 2). When considering central and extensive lesions (described in 8 studies, for 344 hamstring injuries(Cohen et al. 2011; Bruce Hamilton et al. 2018; Opar et al. 2015; Pollock et al. 2016b; Pomeranz et Heidt 1993; Geoffrey M. Verrall et al. 2003; Wangenstein, Bahr, et al. 2017; Wangenstein, Tol, et al. 2017)), the distribution looked homogenous, with 34.0%, 33.4% and 32.6% for proximal, central and distal locations, respectively.

The description combining both muscle head and locations within the muscle was made in only two studies(Crema et al. 2016; A. A. De Smet et Best 2000) dealing with 416(Crema et al. 2016) and 15 lesions,(A. A. De Smet et Best 2000) respectively. Detailed results of hamstring injury distribution are presented in Supplementary data 5.

Sizing presented by dimension and area was provided in 20 and 16 studies (58.8 and 47.1%), respectively, and the volume in 10 studies (29.4%), and summary of mean sizes is presented in Figure 2 and Table 2.

Regarding the severity, Grade 1 (which differed slightly between classification systems) was the most frequently reported (n=923, 50.7%), followed by grades 2 (n=713, 39.1%), grade 0 (147, 8.1%), and 3 (n=39, 2.1%).

About a quarter of patients presented a history of hamstring injury (n=279 of 1086 lesions, 25.7%) but only 2 studies(Koulouris et al. 2007; Wangensteen et al. 2016) provided data regarding the location of previous injuries and re-injury risk. Of the 29 hamstring re-injuries in these two studies, 24 (82.8%) concerned BFLH, 1 (3.4%) ST and 4 (13.8%) SM. The affected tissues were for 18 (62.1%) MTJ, 5(17.2%) MAJ, 2 the muscle belly (6.9%) and 4 (13.8%) the tendon. In only one study(Wangensteen et al. 2016) was the grade of re-injury specified, and of these 19 re-injuries, 10 (52.6%) were grade 1, 7 (36.8%) were grade 2, and 2 (10.5%) were grade 3.

Regarding the clinical mechanism, (reported in 9 studies and 788 hamstring injuries(Askling et al. 2007a, 2007b, 2014; Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013; De Vos et al. 2014; Ekstrand et al. 2012; Opar et al. 2015; Wangensteen et al. 2015, 2018)), the majority (n=436, 55.3%) occurred during sprinting activities. Of the 24 hamstring injuries caused by maximal stretching, 15 were reported in a study(Askling et al. 2007b) with a patient population of dancers, and 14 concerned the SM, and 13 the proximal part of the tendon. An undefined mechanism (n=1, 0.1%) was rarely described.

4. DISCUSSION

The main findings of the present study were that hamstring injuries most frequently involved BFLH (69.8% of all lesions and 76.9% of primary lesions) and its myotendinous junction, and are equally likely to be seen in its proximal, central or distal areas. In addition, our results support the fact that there is currently no agreement / consensus about classification to be used.

Our findings confirm earlier studies reporting that BFLH was the most frequently injured hamstring muscle,(Koulouris et Connell 2005; Patel et al. 2015) with a more accurate view of the problem. Although some hypotheses have been put forward to explain the higher susceptibility of hamstring muscles to injury (e.g. bi-articular,(Kumazaki, Ehara, et Sakai 2012)

composed mainly of fast fibers,(Stępień et al. 2019) subject to significant eccentric forces during explosive sprint and jump performances,(Kenneally-Dabrowski et al. 2019) and/or peak myotendinous strain and negative work during the late swing phase or heel strike(Kenneally-Dabrowski et al. 2019)) the fact that BFLH is most often involved is not well explained. In a quarter of the cases, more than one muscle was injured. This condition may have been underestimated because some articles never mention a second muscle affected and it is not possible to know if this is because there was no secondary injury or if they only reported the main injury. BF and ST was the most common combination probably due to their anatomical proximity.

Although the size of the lesions was described in less than 50% of the lesions, it can be seen that the shape was very ovoid, with a height on average more than 5 times greater than the anteroposterior diameter and the transverse diameter. The lesion thus seems to extend in general in the direction of the shape of the muscle.

The MTJ was involved in more than half of cases (51.9%), far ahead of the other locations. The MTJ of all of the hamstring musculature is very extensive: it runs the entire length of the muscle from the proximal free tendon to the distal free tendon except for the long head of biceps femoris muscle, which has two intramuscular tendons that traverse most but not all of the muscle and slightly overlap (one medial and one lateral)(Stępień et al. 2019). The reason for the predisposition of the MTJ continues to be sought.(Mackey et Kjaer 2017) Nevertheless, the area of attachment between the muscle and the tendon could be an area of weakness, and probably explains this high frequency of injury compared to other structures. The other explanation would simply be to the fact that the two myo-tendinous junctions (proximal and distal) are globally quite extensive and poorly defined spatially (often difficult to differentiate them from aponeurotic junctions), and therefore these lesions would often be so classified by the radiologist.

An important finding of our systematic review was the scarcity and heterogeneity of the description of hamstring injuries reported in the selected literature. Some articles only described one or two parameters, ignoring parameters such as muscle heads, grade, tissue, clinical mechanisms, precise dimensions, sex, sport, history of injuries (e.g. ACL rupture), prior hamstring injuries, or chronic phenomena. Only two articles described the muscle heads and tissues involved in the hamstring injuries, but even these have their limitations. The first (Crema et al. 2016) did not consider the lesions of tendon or fascia separately and some data seems to be different from that generally reported in the literature, whereas the second study (A. A. De Smet et Best 2000) dealt with only 15 lesions. There is a clear need for detailed descriptive studies of hamstring muscle injuries.

The strengths of this systematic review are the rigorous search (2788 articles analyzed from 5 databases) with a low risk of methodological bias of this systematic review. More, the study of the 34 articles retained for analysis provided us a consequent number of hamstring injuries (n=2761) which allows us to give some weight to our conclusions of the distribution of HMI according to muscle head, tissue and location. In addition, all MRIs were performed within 8 days of the injury, which gives additional strength to the study because the MRI signal did not change in this interval. Beyond that, there would be a risk of not detecting the lesion or underestimating the size or grade of the lesion by resorption of edema. (Wangenstein, Bahr, et al. 2017) Given the results of the risk of bias assessment, we consider that all the studies included demonstrate low risk of bias, which enhances the quality of the results obtained from this systematic review.

We have to acknowledge some limitations of our systematic review. Despite a rigorous systematic search, we may have missed articles. The restriction on English language was based on findings from systematic reviews suggesting no evidence of bias for conventional medicine if studies written in languages other than English were excluded. (Moher et al. 2003) The risk of methodological bias for each study seems to be very low, even if potential confounders are possible. Since we are interested in the location and not in the prognosis, we have freed ourselves from the biases previously described on the articles of the hamstrings (especially

the fact that clinicians are not blinded to MRI data).(G. Reurink, Whiteley, et Tol 2015) In addition, even if systematic reviews are exposed to bias given by MRI interpretation from different radiologists, we know that there is a very good intra- and inter-observer reliability, including MRI data analysis of muscle injuries.(Wangensteen, Tol, et al. 2017) Nevertheless, and as mentioned before, the heterogeneity of the available data is an intrinsically limiting factor. Even if some data are detailed in each article, there is no complete description of these lesions.

As perspectives we can suggest that the use of MRI data needs to be further developed, to be more homogenous, and consensus must be reached so that we all use the same terms to describe these injuries. New MR sequences, including quantitative ones (e.g. fat, edema, spectroscopy) may help us better understand the differences between the various muscle heads. Moreover, injuries in women are very insufficiently represented in the literature.

5. CONCLUSION

This study provides a clear view of the distribution of hamstring injuries analyzed by MRI based on a very high number of injuries. The distribution of the hamstring injury location is inhomogeneous, with a high predisposition of BFLH and MTJ. Some injuries seem more associated with a particular injury mechanism, such as SM proximal involvement with or without tendon avulsions. Thus, hamstring injury should be considered as specific lesions, and on well-detailed MRI diagnosis can help to design specific injury-based rehabilitation and prevention programmes.

REFERENCES

Agosti, Abramo et al. 2021. « Deep Learning for Automatic Segmentation of Thigh and Leg Muscles ». *Magma (New York, N.Y.)*.

- Albu, Alexandra Branzan, Trevor Beugeling, et Denis Laurendeau. 2008. « A Morphology-Based Approach for Interslice Interpolation of Anatomical Slices from Volumetric Images ». *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55(8): 2022-38.
- Asakawa, Deanna S., Silvia S. Blemker, Garry E. Gold, et Scott L. Delp. 2002. « In Vivo Motion of the Rectus Femoris Muscle after Tendon Transfer Surgery ». *Journal of Biomechanics* 35(8): 1029-37.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Tõnu Saartok, et Alf Thorstensson. 2007a. « Acute First-Time Hamstring Strains during High-Speed Running: A Longitudinal Study Including Clinical and Magnetic Resonance Imaging Findings ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(2): 197-206.
- . 2007b. « Acute First-Time Hamstring Strains during Slow-Speed Stretching: Clinical, Magnetic Resonance Imaging, and Recovery Characteristics ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(10): 1716-24.
- . 2008. « Proximal Hamstring Strains of Stretching Type in Different Sports: Injury Situations, Clinical and Magnetic Resonance Imaging Characteristics, and Return to Sport ». *The American Journal of Sports Medicine* 36(9): 1799-1804.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Olga Tarassova, et Alf Thorstensson. 2014. « Acute Hamstring Injuries in Swedish Elite Sprinters and Jumpers: A Prospective Randomised Controlled Clinical Trial Comparing Two Rehabilitation Protocols ». *British Journal of Sports Medicine* 48(7): 532-39.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, et Alf Thorstensson. 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): 953-59.
- Balius, Ramon et al. 2019. « Sonographic Landmarks in Hamstring Muscles ». *Skeletal Radiology* 48(11): 1675-83.
- Barnouin, Yoann et al. 2014. « Manual Segmentation of Individual Muscles of the Quadriceps Femoris Using MRI: A Reappraisal ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMIR* 40(1): 239-47.
- Baron, Jacqueline E., Emily A. Parker, Kyle R. Duchman, et Robert W. Westermann. 2020. « Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8(6): 2325967120930296.
- Baumgart, Christian et al. 2021. « Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(16): 8727.
- Becciolini, Marco, Giovanni Bonacchi, et Stefano Bianchi. 2019. « Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine* 38(5): 1367-82.

- Behan, Fearghal P., Thomas M. Maden-Wilkinson, Matt T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2018. « Sex Differences in Muscle Morphology of the Knee Flexors and Knee Extensors ». *PloS One* 13(1): e0190903.
- van Beijsterveldt, A. M. C., I. G. L. van de Port, A. J. Vereijken, et F. J. G. Backx. 2013. « Risk Factors for Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Systematic Review of Prospective Studies ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23(3): 253-62.
- Beltran, Luis, Varand Ghazikhanian, Mario Padron, et Javier Beltran. 2012a. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- . 2012b. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- Besson, J. M. 1997. « [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain] ». *Drugs* 53 Suppl 2: 1-9.
- Birchmeier, Thomas et al. 2020. « Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 38(3): 598-608.
- Bland, J. M., et D. G. Altman. 1986. « Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement ». *Lancet (London, England)* 1(8476): 307-10.
- Bourne, M. N. et al. 2016. « Muscle Activation Patterns in the Nordic Hamstring Exercise: Impact of Prior Strain Injury ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(6): 666-74.
- Brandser, E. A. et al. 1995. « Hamstring Injuries: Radiographic, Conventional Tomographic, CT, and MR Imaging Characteristics ». *Radiology* 197(1): 257-62.
- Brooks, J. H. M., C. W. Fuller, S. P. T. Kemp, et D. B. Reddin. 2005. « A Prospective Study of Injuries and Training amongst the England 2003 Rugby World Cup Squad ». *British Journal of Sports Medicine* 39(5): 288-93.
- Brooks, John H. M., Colin W. Fuller, Simon P. T. Kemp, et Dave B. Reddin. 2006. « Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(8): 1297-1306.
- Buckthorpe, Matthew et al. 2021. « Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(4): 607-24.
- Campbell, Scot E., Ronald Adler, et Carolyn M. Sofka. 2005. « Ultrasound of Muscle Abnormalities ». *Ultrasound Quarterly* 21(2): 87-94; quiz 150, 153-54.
- Chan, Otto, Angelo Del Buono, Thomas M. Best, et Nicola Maffulli. 2012. « Acute Muscle Strain Injuries: A Proposed New Classification System ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 20(11): 2356-62.

- Chang, Justin S. et al. 2020. « Management of Hamstring Injuries: Current Concepts Review ». *The Bone & Joint Journal* 102-B(10): 1281-88.
- Cohen, Steven B. et al. 2011. « Hamstring Injuries in Professional Football Players: Magnetic Resonance Imaging Correlation with Return to Play ». *Sports Health* 3(5): 423-30.
- Connell, David A. et al. 2004. « Longitudinal Study Comparing Sonographic and MRI Assessments of Acute and Healing Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 183(4): 975-84.
- Constantin-Teodosiu, Dumitru, et Despina Constantin. 2021. « Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *International Journal of Molecular Sciences* 22(21): 11587.
- Crema, Michel D. et al. 2015. « Imaging Techniques for Muscle Injury in Sports Medicine and Clinical Relevance ». *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 8(2): 154-61.
- . 2016. « Acute Hamstring Injury in Football Players: Association between Anatomical Location and Extent of Injury-A Large Single-Center MRI Report ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19(4): 317-22.
- Crema, Michel D., Ivan R. B. Godoy, et al. 2018. « Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play ». *Sports Health* 10(1): 75-79.
- Crema, Michel D., Mohamed Jarraya, et al. 2018a. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- . 2018b. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- Dalton, Sara L., Zachary Y. Kerr, et Thomas P. Dompier. 2015. « Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(11): 2671-79.
- Danielsson, Adam et al. 2020. « The Mechanism of Hamstring Injuries - a Systematic Review ». *BMC musculoskeletal disorders* 21(1): 641.
- De Smet, A. A., et T. M. Best. 2000. « MR Imaging of the Distribution and Location of Acute Hamstring Injuries in Athletes ». *AJR. American journal of roentgenology* 174(2): 393-99.
- De Smet, AA, et TM Best. 2000. « MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes ». *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY* 174(2): 393-99.
- De Vos, Robert-Jan et al. 2014. « Clinical Findings Just after Return to Play Predict Hamstring Re-Injury, but Baseline MRI Findings Do Not ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1377-84.

Delvaux, François et al. 2014. « Return-to-Play Criteria after Hamstring Injury: Actual Medicine Practice in Professional Soccer Teams ». *Journal of Sports Science & Medicine* 13(3): 721-23.

Dictionnaire Larousse.

Diemer, Willemijn M. et al. 2021. « Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million Sport Exposure Hours ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 51(1): 27-36.

Dorn, Tim W., Anthony G. Schache, et Marcus G. Pandy. 2012. « Muscular Strategy Shift in Human Running: Dependence of Running Speed on Hip and Ankle Muscle Performance ». *The Journal of Experimental Biology* 215(Pt 11): 1944-56.

Dunlop, Gordon et al. 2020. « Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 50(4): 829-40.

Edouard, Pascal et al. 2021a. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport*.

———. 2021b. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 24(7): 653-59.

Edouard, Pascal, Pedro Branco, et Juan-Manuel Alonso. 2016a. « 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): 619-30.

———. 2016b. « 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): 619-30.

Ekstrand, Jan et al. 2012. « Hamstring Muscle Injuries in Professional Football: The Correlation of MRI Findings with Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 46(2): 112-17.

———. 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): 292-98.

Ekstrand, Jan, Martin Häggglund, et Markus Waldén. 2011. « Epidemiology of Muscle Injuries in Professional Football (Soccer) ». *The American Journal of Sports Medicine* 39(6): 1226-32.

- Ekstrand, Jan, Justin C. Lee, et Jeremiah C. Healy. 2016. « MRI Findings and Return to Play in Football: A Prospective Analysis of 255 Hamstring Injuries in the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 738-43.
- Ekstrand, Jan, Armin Spreco, Håkan Bengtsson, et Roald Bahr. 2021a. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- . 2021b. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Ekstrand, Jan, Markus Waldén, et Martin Hägglund. 2016. « Hamstring Injuries Have Increased by 4% Annually in Men's Professional Football, since 2001: A 13-Year Longitudinal Analysis of the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 731-37.
- Evangelidis, Pavlos E., Garry J. Massey, Matthew T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2016. « Strength and Size Relationships of the Quadriceps and Hamstrings with Special Reference to Reciprocal Muscle Balance ». *European Journal of Applied Physiology* 116(3): 593-600.
- Farrow, M. et al. 2021. « Quantitative MRI in Myositis Patients: Comparison with Healthy Volunteers and Radiological Visual Assessment ». *Clinical Radiology* 76(1): 81.e1-81.e10.
- Fedorov, Andriy et al. 2012. « 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network ». *Magnetic Resonance Imaging* 30(9): 1323-41.
- Fitzpatrick, Anna C., Adam S. Naylor, Peter Myler, et Colin Robertson. 2018. « A Three-Year Epidemiological Prospective Cohort Study of Rugby League Match Injuries from the European Super League ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21(2): 160-65.
- Fletcher, Amanda N., Jonathan W. Cheah, Shane J. Nho, et Richard C. Mather. 2021. « Proximal Hamstring Injuries ». *Clinics in Sports Medicine* 40(2): 339-61.
- Flores, Dyan V. et al. 2018. « MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 38(1): 124-48.
- Franchi, M. V. et al. 2014a. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- . 2014b. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.

- Francis, Peter et al. 2017. « Measurement of Muscle Health in Aging ». *Biogerontology* 18(6): 901-11.
- Freckleton, Grant, et Tania Pizzari. 2013. « Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 47(6): 351-58.
- Fried, T., et G. J. Lloyd. 1992. « An Overview of Common Soccer Injuries. Management and Prevention ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 14(4): 269-75.
- Frouin, Antoine et al. 2023. « Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes ». *Ultrasound in Medicine & Biology*: S0301-5629(23)00064-9.
- Fukunaga, T. et al. 2001. « Muscle Volume Is a Major Determinant of Joint Torque in Humans ». *Acta Physiologica Scandinavica* 172(4): 249-55.
- Gabbe, B. J. et al. 2006. « Predictors of Hamstring Injury at the Elite Level of Australian Football ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 16(1): 7-13.
- Geirsson, R. T., A. D. Christie, et N. Patel. 1982a. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- . 1982b. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- Gibbs, N. J., T. M. Cross, M. Cameron, et M. T. Houang. 2004. « The Accuracy of MRI in Predicting Recovery and Recurrence of Acute Grade One Hamstring Muscle Strains within the Same Season in Australian Rules Football Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 7(2): 248-58.
- Gibby, Wendell A. 2005. « Basic Principles of Magnetic Resonance Imaging ». *Neurosurgery Clinics of North America* 16(1): 1-64.
- Gouttebauge, Vincent, Brendan A. Hughes Schwab, Adam Vivian, et Gino M M J Kerkhoffs. 2016. « Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(1): e31385.
- Grange, Sylvain et al. 2022. « Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review ». *Sports Health*: 19417381211071010.
- Gray, Calum et al. 2011. « Magnetic Resonance Imaging with K-Means Clustering Objectively Measures Whole Muscle Volume Compartments in Sarcopenia/Cancer Cachexia ». *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)* 30(1): 106-11.
- Gronwald, Thomas et al. 2022. « Hamstring Injury Patterns in Professional Male Football (Soccer): A Systematic Video Analysis of 52 Cases ». *British Journal of Sports Medicine* 56(3): 165-71.

- Guerini, Henri et al. 2015. « Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 19(4): 335-47.
- Guillodo, Yannick et al. 2014. « Clinical Predictors of Time to Return to Competition Following Hamstring Injuries ». *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 4(3): 386-90.
- Hägglund, M., M. Waldén, et J. Ekstrand. 2006. « Previous Injury as a Risk Factor for Injury in Elite Football: A Prospective Study over Two Consecutive Seasons ». *British Journal of Sports Medicine* 40(9): 767-72.
- Hägglund, Martin et al. 2013. « Injuries Affect Team Performance Negatively in Professional Football: An 11-Year Follow-up of the UEFA Champions League Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 47(12): 738-42.
- Hallén, Anna, et Jan Ekstrand. 2014. « Return to Play Following Muscle Injuries in Professional Footballers ». *Journal of Sports Sciences* 32(13): 1229-36.
- Hamilton, B. et al. 2014. « Excellent Reliability for MRI Grading and Prognostic Parameters in Acute Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1385-87.
- Hamilton, Bruce et al. 2018. « Cohen's MRI Scoring System Has Limited Value in Predicting Return to Play ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 26(4): 1288-94.
- Hayden, Jill A., Pierre Côté, et Claire Bombardier. 2006. « Evaluation of the Quality of Prognosis Studies in Systematic Reviews ». *Annals of Internal Medicine* 144(6): 427-37.
- Hegyi, A., A. Péter, T. Finni, et N. J. Cronin. 2018. « Region-Dependent Hamstrings Activity in Nordic Hamstring Exercise and Stiff-Leg Deadlift Defined with High-Density Electromyography ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 28(3): 992-1000.
- van Heumen, Moniek et al. 2017. « The Prognostic Value of MRI in Determining Reinjury Risk Following Acute Hamstring Injury: A Systematic Review ». *British Journal of Sports Medicine* 51(18): 1355-63.
- Hickey, Jack, Anthony J. Shield, Morgan D. Williams, et David A. Opar. 2014a. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- . 2014b. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- Hickey, Jack T., David A. Opar, Leigh J. Weiss, et Bryan C. Heiderscheit. 2022. « Hamstring Strain Injury Rehabilitation ». *Journal of Athletic Training* 57(2): 125-35.
- Higashihara, Ayako et al. 2010. « Functional Differences in the Activity of the Hamstring Muscles with Increasing Running Speed ». *Journal of Sports Sciences* 28(10): 1085-92.

- Hioki, Maya et al. 2020a. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- . 2020b. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- Hogrel, Jean-Yves et al. 2015. « NMR Imaging Estimates of Muscle Volume and Intramuscular Fat Infiltration in the Thigh: Variations with Muscle, Gender, and Age ». *Age (Dordrecht, Netherlands)* 37(3): 9798.
- Islam, S. et al. 2022. « Fully Automated Deep-Learning Section-Based Muscle Segmentation from CT Images for Sarcopenia Assessment ». *Clinical Radiology* 77(5): e363-71.
- Iversen, Erik, Vibeke Røstad, et Arne Larmo. 2016. « Intermittent Blood Flow Restriction Does Not Reduce Atrophy Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Journal of Sport and Health Science* 5(1): 115-18.
- Jacobsen, Phil et al. 2016. « A Combination of Initial and Follow-up Physiotherapist Examination Predicts Physician-Determined Time to Return to Play after Hamstring Injury, with No Added Value of MRI ». *British Journal of Sports Medicine* 50(7): 431-39.
- Kemnitz, Jana et al. 2020. « Clinical Evaluation of Fully Automated Thigh Muscle and Adipose Tissue Segmentation Using a U-Net Deep Learning Architecture in Context of Osteoarthritic Knee Pain ». *Magma (New York, N.Y.)* 33(4): 483-93.
- Kenneally-Dabrowski, Claire J. B. et al. 2019. « Late Swing or Early Stance? A Narrative Review of Hamstring Injury Mechanisms during High-Speed Running ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 29(8): 1083-91.
- Kilroe, Sean P. et al. 2020a. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- . 2020b. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- Koulouris, George, et David Connell. 2003. « Evaluation of the Hamstring Muscle Complex Following Acute Injury ». *Skeletal Radiology* 32(10): 582-89.
- . 2005. « Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 25(3): 571-86.
- Koulouris, George, David A. Connell, Peter Brukner, et Michal Schneider-Kolsky. 2007. « Magnetic Resonance Imaging Parameters for Assessing Risk of Recurrent Hamstring Injuries in Elite Athletes ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(9): 1500-1506.
- Kulas, Anthony S. et al. 2018. « Bilateral Quadriceps and Hamstrings Muscle Volume Asymmetries in Healthy Individuals ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 36(3): 963-70.

- Kumazaki, T., Y. Ehara, et T. Sakai. 2012. « Anatomy and Physiology of Hamstring Injury ». *International Journal of Sports Medicine* 33(12): 950-54.
- Le Troter, Arnaud et al. 2016. « Volume Measurements of Individual Muscles in Human Quadriceps Femoris Using Atlas-Based Segmentation Approaches ». *Magma (New York, N.Y.)* 29(2): 245-57.
- Lemes, Italo Ribeiro et al. 2021. « Do Exercise-Based Prevention Programmes Reduce Non-Contact Musculoskeletal Injuries in Football (Soccer)? A Systematic Review and Meta-Analysis with 13 355 Athletes and More than 1 Million Exposure Hours ». *British Journal of Sports Medicine* 55(20): 1170-78.
- Linklater, James M. et al. 2010. « Hamstring Injuries: Anatomy, Imaging, and Intervention ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 14(2): 131-61.
- Lins, Carolina Freitas, Carlos Ernesto Garrido Salmon, et Marcello Henrique Nogueira-Barbosa. 2021. « Applications of the Dixon Technique in the Evaluation of the Musculoskeletal System ». *Radiologia Brasileira* 54(1): 33-42.
- Liu, Jia, Kristi L. Lewton, Patrick M. Colletti, et Christopher M. Powers. 2021. « Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(11): 2346-53.
- Louis, Luck J. 2008. « Musculoskeletal Ultrasound Intervention: Principles and Advances ». *Radiologic Clinics of North America* 46(3): 515-33, vi.
- Macdonald, Ben et al. 2019. « Hamstring Rehabilitation in Elite Track and Field Athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in Clinical Practice ». *British Journal of Sports Medicine* 53(23): 1464-73.
- Mack, Christina D. et al. 2020. « Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018 ». *The American Journal of Sports Medicine* 48(9): 2287-94.
- Mackey, Abigail L., et Michael Kjaer. 2017. « The Breaking and Making of Healthy Adult Human Skeletal Muscle in Vivo ». *Skeletal Muscle* 7(1): 24.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Gustaaf Reurink, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Injury Is Not Associated with an Increased Hamstring Reinjury Rate within 12 Months after Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 52(19): 1261-66.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Rod Whiteley, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Involvement on MRI Has Limited Value for Predicting Time to Return to Play Following Acute Hamstring Injury ». *British Journal of Sports Medicine* 52(2): 83-88.
- Mallinson, Joanne E. et al. 2020. « Longitudinal Hypertrophic and Transcriptional Responses to High-Load Eccentric-Concentric vs Concentric Training in Males ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 30(11): 2101-15.
- Mandić, Mirko et al. 2020. « Automated Assessment of Regional Muscle Volume and Hypertrophy Using MRI ». *Scientific Reports* 10(1): 2239.

- McCormick, Matthew et al. 2014. « ITK: Enabling Reproducible Research and Open Science ». *Frontiers in Neuroinformatics* 8: 13.
- Mendez-Villanueva, Alberto et al. 2016. « MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players ». *PLoS One* 11(9): e0161356.
- Mendiguchia, Jurdan et al. 2017. « A Multifactorial, Criteria-Based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 49(7): 1482-92.
- Mense, Siegfried. 2003. « The Pathogenesis of Muscle Pain ». *Current Pain and Headache Reports* 7(6): 419-25.
- Millan, M. J. 1999. « The Induction of Pain: An Integrative Review ». *Progress in Neurobiology* 57(1): 1-164.
- Moher, D., B. Pham, M. L. Lawson, et T. P. Klassen. 2003. « The Inclusion of Reports of Randomised Trials Published in Languages Other than English in Systematic Reviews ». *Health Technology Assessment (Winchester, England)* 7(41): 1-90.
- Monti, Elena et al. 2020. « The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training ». *Frontiers in Physiology* 11: 946.
- Morin, Jean-Benoît et al. 2015. « Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production ». *Frontiers in Physiology* 6: 404.
- Morse, Christopher I., Hans Degens, et David A. Jones. 2007. « The Validity of Estimating Quadriceps Volume from Single MRI Cross-Sections in Young Men ». *European Journal of Applied Physiology* 100(3): 267-74.
- Mühlenfeld, Nils et al. 2021. « Assessment of Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Football Players after Hamstring Injuries ». *European Journal of Sport Science*: 1-9.
- Nescolarde, L. et al. 2015. « Effects of Muscle Injury Severity on Localized Bioimpedance Measurements ». *Physiological Measurement* 36(1): 27-42.
- Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. 2019. « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI) ». *Journal de Traumatologie du Sport*.
- Nguyen, Hoai-Thu et al. 2021. « Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(4): 869-81.
- Nordez, Antoine et al. 2009. « Comparison of Methods to Assess Quadriceps Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMIR* 30(5): 1116-23.

- Nuell, Sergi et al. 2019a. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- . 2019b. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- Opar, David A. et al. 2015. « The Effect of Previous Hamstring Strain Injuries on the Change in Eccentric Hamstring Strength during Preseason Training in Elite Australian Footballers ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(2): 377-84.
- Orchard, J., et H. Seward. 2002. « Epidemiology of Injuries in the Australian Football League, Seasons 1997-2000 ». *British Journal of Sports Medicine* 36(1): 39-44.
- O’Sullivan, Lucy, Jamie Preszler, et Miho Tanaka. 2022. « Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 17(6): 1184-93.
- Panisset, Maya G. et al. 2020. « Factors Influencing Thigh Muscle Volume Change with Cycling Exercises in Acute Spinal Cord Injury - a Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial ». *The Journal of Spinal Cord Medicine*: 1-12.
- Patel, A. et al. 2015. « British Athletics Muscle Injury Classification: A Reliability Study for a New Grading System ». *Clinical Radiology* 70(12): 1414-20.
- Paton, Bruce M. et al. 2023. « London International Consensus and Delphi Study on Hamstring Injuries Part 1: Classification ». *British Journal of Sports Medicine*: bjsports-2021-105371.
- Petrons, P. 2002a. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- . 2002b. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- Pieters, Dries, Evi Wezenbeek, Joke Schuermans, et Erik Witvrouw. 2021. « Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It Is Time to Consider Natural Healing ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(10): 2067-77.
- Pollock, Noel et al. 2016a. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous (‘c’) Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2016b. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous (‘c’) Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2021. « A 4-Year Study of Hamstring Injury Outcomes in Elite Track and Field Using the British Athletics Rehabilitation Approach ». *British Journal of Sports Medicine*.

- Pollock, Noel, Steven L. J. James, Justin C. Lee, et Robin Chakraverty. 2014a. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- . 2014b. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- Pomeranz, S. J., et R. S. Heidt. 1993. « MR Imaging in the Prognostication of Hamstring Injury. Work in Progress ». *Radiology* 189(3): 897-900.
- Pons, Christelle et al. 2018. « Quantifying Skeletal Muscle Volume and Shape in Humans Using MRI: A Systematic Review of Validity and Reliability ». *PloS One* 13(11): e0207847.
- Rees, Huw et al. 2021. « The Burden of Injury in Field Hockey: A Secondary Analysis of Prospective Cohort Data ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 31(4): 884-93.
- Rettig, Arthur C., Susan Meyer, et Arup K. Bhadra. 2013a. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- . 2013b. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- Reurink, G., R. Whiteley, et J. L. Tol. 2015. « Hamstring Injuries and Predicting Return to Play: “Bye-Bye MRI?” ». *British Journal of Sports Medicine* 49(18): 1162-63.
- Reurink, Gustaaf et al. 2014. « MRI Observations at Return to Play of Clinically Recovered Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1370-76.
- Reurink, Gustaaf, Elisabeth G. Brillman, et al. 2015. « Magnetic Resonance Imaging in Acute Hamstring Injury: Can We Provide a Return to Play Prognosis? ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45(1): 133-46.
- Reurink, Gustaaf, Emad Almusa, et al. 2015. « No Association between Fibrosis on Magnetic Resonance Imaging at Return to Play and Hamstring Reinjury Risk ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(5): 1228-34.
- Rubin, David A. 2012. « Imaging Diagnosis and Prognostication of Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 199(3): 525-33.
- Rush, Justin L., Grant E. Norte, et Adam S. Lepley. 2020. « Limb Differences in Hamstring Muscle Function and Morphology after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 45: 168-75.
- Safar Cherati, Afsaneh et al. 2016. « The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and Its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(3): e35289.

- Schache, Anthony G. et al. 2012. « Mechanics of the Human Hamstring Muscles during Sprinting ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(4): 647-58.
- Schneider-Kolsky, Michal E., Jan Lucas Hoving, Price Warren, et David A. Connell. 2006. « A Comparison between Clinical Assessment and Magnetic Resonance Imaging of Acute Hamstring Injuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(6): 1008-15.
- Sciascia, Aaron, Jacob Waldecker, et Cale Jacobs. 2020. « Pain Catastrophizing in College Athletes ». *Journal of Sport Rehabilitation* 29(2): 168-73.
- Shield, Anthony J., et Matthew N. Bourne. 2018. « Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 48(3): 513-24.
- Silder, Amy et al. 2013. « Clinical and Morphological Changes Following 2 Rehabilitation Programs for Acute Hamstring Strain Injuries: A Randomized Clinical Trial ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 43(5): 284-99.
- Slavotinek, John P., Geoffrey M. Verrall, et Gerald T. Fon. 2002. « Hamstring Injury in Athletes: Using MR Imaging Measurements to Compare Extent of Muscle Injury with Amount of Time Lost from Competition ». *AJR. American journal of roentgenology* 179(6): 1621-28.
- Söderman, K., H. Alfredson, T. Pietilä, et S. Werner. 2001. « Risk Factors for Leg Injuries in Female Soccer Players: A Prospective Investigation during One out-Door Season ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 9(5): 313-21.
- Souza, Jaqueline de, et Carmem Gottfried. 2013. « Muscle Injury: Review of Experimental Models ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 23(6): 1253-60.
- Speer, K. P., J. Lohnes, et W. E. Garrett. 1993. « Radiographic Imaging of Muscle Strain Injury ». *The American Journal of Sports Medicine* 21(1): 89-95; discussion 96.
- Sprague, Andrew L. et al. 2018. « Modifiable Risk Factors for Patellar Tendinopathy in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 52(24): 1575-85.
- Stępień, Karolina et al. 2019. « Anatomy of Proximal Attachment, Course, and Innervation of Hamstring Muscles: A Pictorial Essay ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 27(3): 673-84.
- Tate, Christine Marie, Glenn N. Williams, Peter J. Barrance, et Thomas S. Buchanan. 2006. « Lower Extremity Muscle Morphology in Young Athletes: An MRI-Based Analysis ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(1): 122-28.
- Timmins, Ryan G. et al. 2016. « Short Biceps Femoris Fascicles and Eccentric Knee Flexor Weakness Increase the Risk of Hamstring Injury in Elite Football (Soccer): A Prospective Cohort Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(24): 1524-35.

- Torğutalp, Şerife Şeyma et al. 2021. « Volume and T2 Relaxation Time Measurements of Quadriceps Femoris and Hamstring Muscles Are Reliable and Reproducible ». *Turkish Journal of Medical Sciences* 51(4): 2007-14.
- Trappe, T. A., D. M. Lindquist, et J. A. Carrithers. 2001a. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- . 2001b. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- Verrall, G. M. et al. 2001. « Clinical Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury: A Prospective Study with Correlation of Injury by Magnetic Resonance Imaging ». *British Journal of Sports Medicine* 35(6): 435-39; discussion 440.
- Verrall, G. M., Y. Kalairajah, J. P. Slavotinek, et A. J. Spriggins. 2006. « Assessment of Player Performance Following Return to Sport after Hamstring Muscle Strain Injury ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 9(1-2): 87-90.
- Verrall, Geoffrey M. et al. 2006. « Assessment of Physical Examination and Magnetic Resonance Imaging Findings of Hamstring Injury as Predictors for Recurrent Injury ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 36(4): 215-24.
- Verrall, Geoffrey M., John P. Slavotinek, Peter G. Barnes, et Gerald T. Fon. 2003. « Diagnostic and Prognostic Value of Clinical Findings in 83 Athletes with Posterior Thigh Injury: Comparison of Clinical Findings with Magnetic Resonance Imaging Documentation of Hamstring Muscle Strain ». *The American Journal of Sports Medicine* 31(6): 969-73.
- Vivodtzev, Isabelle et al. 2018. « Quadriceps Muscle Fat Infiltration Is Associated with Cardiometabolic Risk in COPD ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 38(5): 788-97.
- Walsh, Meghan et al. 2012. « Lower Extremity Muscle Activation and Knee Flexion during a Jump-Landing Task ». *Journal of Athletic Training* 47(4): 406-13.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2015. « MRI Does Not Add Value over and above Patient History and Clinical Examination in Predicting Time to Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Cohort of 180 Male Athletes ». *British Journal of Sports Medicine* 49(24): 1579-87.
- . 2016. « Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 44(8): 2112-21.
- Wangenstein, Arnlaug, Johannes L. Tol, et al. 2017. « Intra- and Interrater Reliability of Three Different MRI Grading and Classification Systems after Acute Hamstring Injuries ». *European Journal of Radiology* 89: 182-90.

- Wangenstein, Arnlaug, Roald Bahr, et al. 2017. « MRI Appearance Does Not Change in the First 7 Days after Acute Hamstring Injury-a Prospective Study ». *British Journal of Sports Medicine* 51(14): 1087-92.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2018. « New MRI Muscle Classification Systems and Associations with Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Study ». *European Radiology* 28(8): 3532-41.
- Weber, Kenneth A. et al. 2019. « Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury ». *Scientific Reports* 9(1): 7973.
- Williams, Sean, Grant Trewartha, Simon Kemp, et Keith Stokes. 2013. « A Meta-Analysis of Injuries in Senior Men's Professional Rugby Union ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 43(10): 1043-55.
- Williamson, Amelia, et Barbara Hoggart. 2005. « Pain: A Review of Three Commonly Used Pain Rating Scales ». *Journal of Clinical Nursing* 14(7): 798-804.
- Woods, C. et al. 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.
- Wu, Y. F. et al. 2021. « [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging] ». *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 53(5): 843-49.
- Yamauchi, Koun, Chisato Kato, et Takayuki Kato. 2019. « Characteristics of Individual Thigh Muscles Including Cross-Sectional Area and Adipose Tissue Content Measured by Magnetic Resonance Imaging in Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study ». *Rheumatology International* 39(4): 679-87.
- Yang, Zepa et al. 2023. « Deep Learning-Based Pectoralis Muscle Volume Segmentation Method from Chest Computed Tomography Image Using Sagittal Range Detection and Axial Slice-Based Segmentation ». *PloS One* 18(9): e0290950.

Figures:

Figure 1.

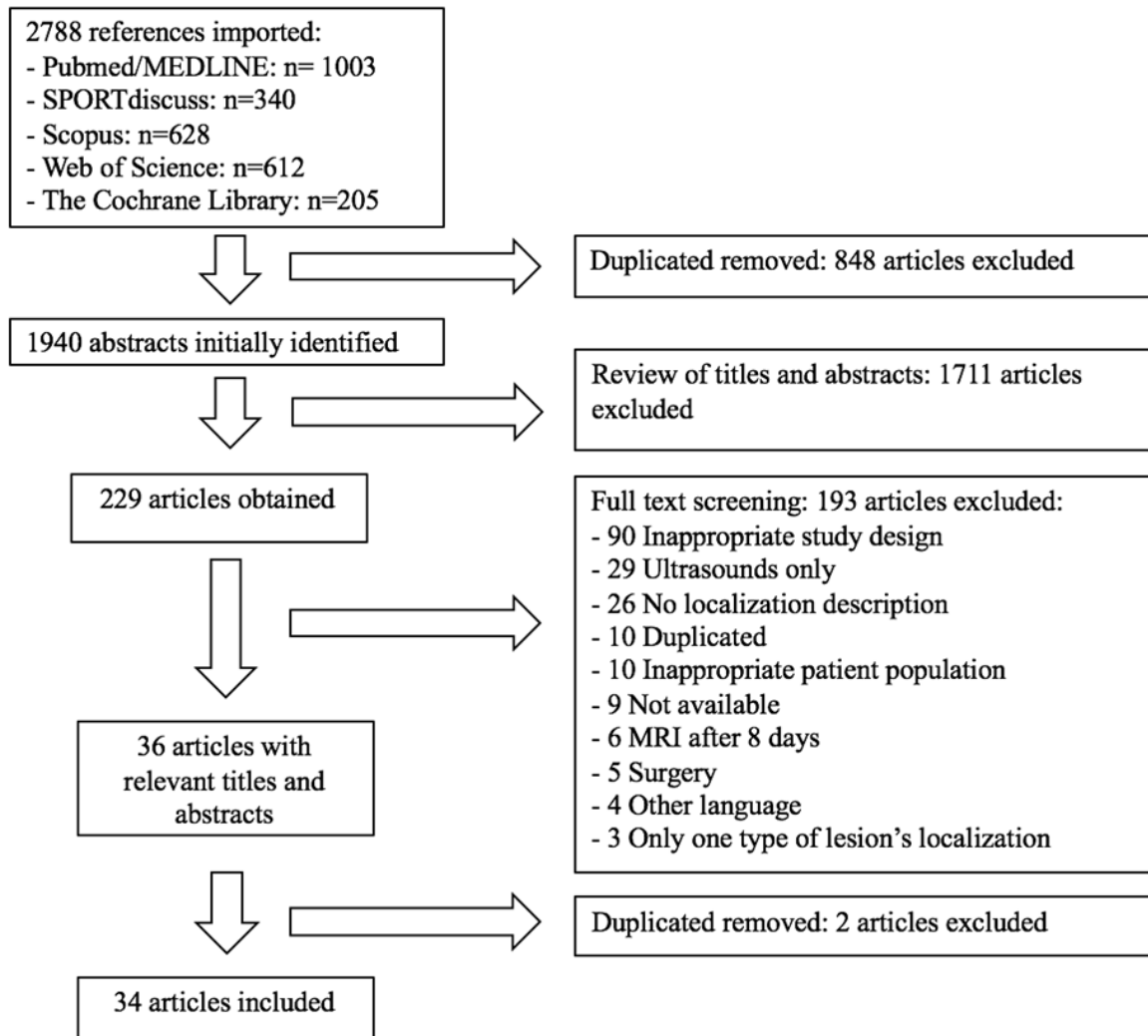


Figure 1. Flow Chart illustrating the different stages of the study inclusion and exclusion process in the present systematic review.

Figure 2.

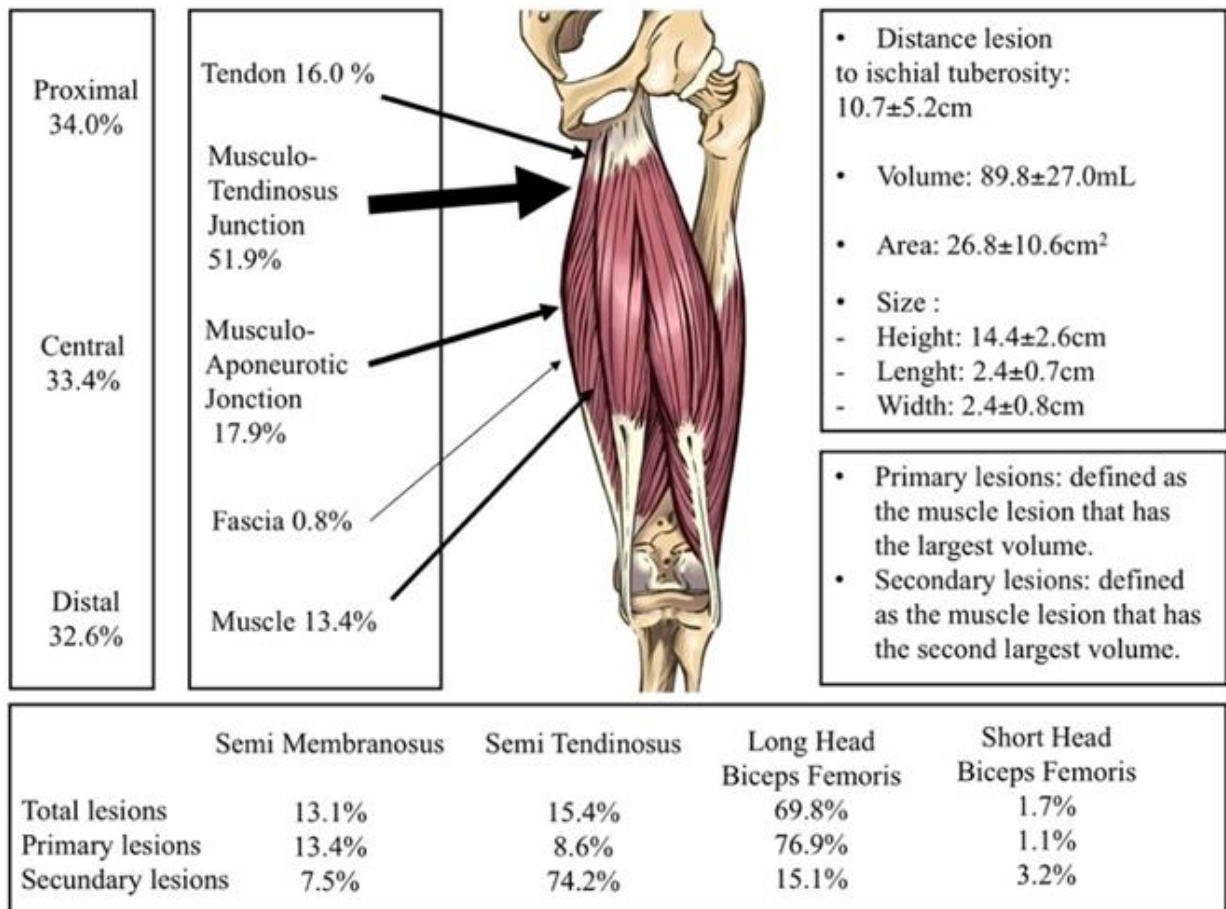


Figure 2. Location of hamstring injuries based on 2761 injuries detailed in the 34 included studies.

Tables:

Table 1.

Study	Study design	Country	Number of participants (total (M/W)) Age: Average (sd-min-max) (years)	Sport	Level*(number of patients)	Classification used	Number of lesions	Delay injury/MRI Average (sd-min-max) (days)	Muscle concerned (BFLH/BFSH/ST/SM)(%)	Primary localization inside muscle (MTJ/MAJ/Aponeurosis/muscle/tendon) (%)
Askling et al.(Askling et al. 2007b)	Prospective	Sweden	15 (1/14) NR (NR-16-24)	Dance	High (15)	NR	13	4	0/0/0/100	0/0/0/0/100
Askling et al.(Askling et al. 2007a)	Prospective	Sweden	18 (10/8) NR (NR-15-28)	Athletics (Sprint)	High (18)	NR	26	4	100/0/0/0	89/0/0/11/0
Askling et al.(Askling, Tengvar, et Thorstensson 2013)	Prospective	Sweden	75 (69/6) 25 (5-NR-NR)	American football	High (67) and low (8)	NR	75	5	76/NR/0/24	71/NR/NR/NR/NR
Askling et al.(Askling et al. 2014)	Prospective	Sweden	56 (36/20) 20 (NR-NR-NR)	Athletics (Sprint and jump)	High (56)	NR	56	5	79/0/14/7	43/NR/NR/NR/NR
Cohen et al.(Cohen)	Retrospective	USA	38 (38/0)	American	High (38)	1=not hing ; 2 = or	55	3	NR/NR/NR/NR/NR	NR/NR/NR/NR/NR

et al. 2011)			27 (NR- 22-35)	footb all		less 50%r uptur e ; 3= 50% ruptu re ; new classif icatio n propo sed				
Connell et al.(Conne ll et al. 2004)	Prospectiv e	Austr alia	60 (60/0) 24 (4- NR-NR)	Ameri can footb all	High (60)	NR	42	3	NR/NR /NR/N R/NR	55/37/ 0/0/8
Crema et al.(Crema et al. 2016)	Retrospec tive	Qatar	275 (275/0) 25 (5- 18-39)	Ameri can footb all	High (275)	edem a VS tear VS avulsi on	393	5	56/6/2 4/14	52/16/ NR/32 /NR
Crema et al.(Crema , Godoy, et al. 2018)	Retrospec tive	Brasil	22 (22/0) 26 (5- 19-24)	Socce r	High (22)	Modif ied Peetr ons	22	3	66/0/2 8/6	63/37/ 0/0/0
Crema et al.(Crema , Jarraya, et al. 2018a)	Retrospec tive	USA	11274 (NR) NR (NR- NR-NR)	Sever al	High ((38))	Modif ied Peetr ons / BAMI	29	7**	100/0/ 0/0	NR/NR /NR/N R/NR
Desmet et al.(A. A. De Smet et Best 2000)	Retrospec tive	USA	15 (14/1) NR (NR-18- 22)	Sever al	Low (15)	NR	15	5	73/0/2 0/2	47/NR /NR/5 3/NR
Devos et al.(De	Prospectiv e	New- Zeala nd	161 (61/3)	Sever al	High (49) and	edem a vs. tear	64	5	88/NR /NR/N R	NR/NR /NR/N R/NR

Vos et al. 2014)			28 (NR-23-33)		low (15)	vs. avulsion				
Ekstrand et al.(Ekstrand et al. 2012)	Prospective	Sweden	816 (207/0) NR (NR-NR-NR)	Soccer	High (207)	Modified Peetr ons	207	2	NR/NR /NR/N R	NR/NR /NR/N R/NR
Ekstrand et al.(Ekstrand, Lee, et Healy 2016)	Prospective	Sweden	255 (255/0) NR (NR-NR-NR)	Soccer	High (255)	Modified Peetr ons	255	2	84/NR /5/11	61/25/ 4/10/ NR/
Gibbs et al.(Gibbs et al. 2004)	Prospective	Australia	13 (13/0) NR (NR-18-33)	Australian football	High (13)	edema vs. tear vs. avulsion	17	3	58/NR /21/21	NR/NR /NR/N R/NR
Hallen et al.(Hallén et Ekstrand 2014)	Prospective	Sweden	249 (249/0) NR (NR-NR-NR)	Soccer	High (249)	Modified Peetr ons	249	2	83/NR /5/12	NR/NR /NR/N R/NR
Hamilton et al.(B. Hamilton et al. 2014)	Prospective	Qatar	25 (NR) NR (NR-NR-NR)	Sever al	High (24) and low (1)	Modified Peetr ons	25	5	NR/NR /NR/N R	NR/NR /NR/N R/NR
Hamilton et al.(Bruce Hamilton et al. 2018)	Prospective	Qatar	139 (139/0) 26 (NR-18-39)	Soccer	High (139)	New classification proposed	110	5	81/1/3 /15	NR/NR /NR/N R/NR
Koulouris et al.(Koulouris et al. 2007)	Prospective	Australia	41 (41/0) NR (NR-NR-NR)	Australian football	High (41)	NR	51	3	88/NR /4/8	53/41/ NR/NR /6

Nercolard e et al.(Nescol arde et al. 2015)	Prospectiv e	Spain	7 (7/0) 19 (NR- NR-NR)	Socce r	High (7)	edem a vs. tear vs. avulsi on	7	1	71/NR /0/29	NR/NR /NR/N R/NR
Opar et al.(Opar et al. 2015)	Prospectiv e	Austr alia	99 (99/0) NR (NR- NR-NR)	Austr alian footb all	High (99)	NR	17	3	76/0/1 2/12	70/0/ NR/24 /6
Pollock et al.(Polloc k et al. 2016b)	Retrospec tive	Engla nd	44 (28/16) 24 (4- 18-39)	Athlet ics	High (44)	BAMI	65	7	70/3/1 0/17	50/16/ NR/NR /
Pomeran z et al.(Pomer anz et Heidt 1993)	Retrospec tive	USA	12 (12/0) NR(NR- 20-29)	Athlet ics	High (12)	1=not hing ; 2 = or less 50%r uptur e ; 3= 50% ruptu re	12	8	50/NR /8/42	44/NR /NR/4 4/12
Rettig et al.(Rettig, Meyer, et Bhadra 2013b)	Retrospec tive	USA	(53/0) 25 (NR- 22-28)	Ameri can footb all	High (10)	1 = edem a =8cm or inferi or ; 2 superi or 8cm ; ruptu re	10	2	80/NR /0/20	NR/NR /NR/N R/NR
Reunik et al.(Ekstra nd, Lee, et Healy 2016)	Prospectiv e	Nethe rlands	53 27 (NR- 18-46)	Sever al	High (24) and low (29)	Modif ied Peetr ons	53	5	80/0/4 /16	NR/NR /NR/N R/NR

Reunik et al.(Gustaf Reurink, Almusa, et al. 2015)	Prospective	Netherlands	108 (108/3) 28 (7-NR-NR)	Several	High (44) and low (64)	Modified Peertrons	108	5	81/NR/4/15	NR/NR/NR/NR
Slavotinek et al.(Slavotinek, Verrall, et Fon 2002)	Prospective	Australia	37 (37/0) 24 (NR-17-32)	Australian football	High (37)	New classification proposed	30	6	70/0/30/0	93/7/NR/NR/NR
Vandermade et al.(van der Made, Almusa, Reurink, et al. 2018)	Prospective	Netherlands	165 (NR) 26 (NR-NR-NR)	Several	High (87) and low (68)	Modified Peertrons	165	5	82/NR/4/14	0/0/0/0/100
Vandermade et al.(van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018)	Prospective	Netherlands	70 (70/0) 24 (NR-21-30)	Several	High (69) and low (1)	Modified Peertrons / BAMI	70	5	80/NR/3/17	0/0/0/0/100
Verral et al.(Geoffrey M. Verrall et al. 2003)	Prospective	Australia	83 (83/0) NR (NR-NR-NR)	Australian football	High (83)	New classification proposed	80	6	72/NR/21/7	NR/NR/NR/NR
Wangenstein et al.(Wangenstein et al. 2015)	Prospective	Qatar	180 (180/0) 26 (5-NR-NR)	Several	High (177) and low (3)	Modified Peertrons	141	5	79/1/3/17	NR/NR/NR/NR

Wangenstein et al.(Wangenstein et al. 2016)	Prospective	Qatar	180 (180/0) 26 (5-NR-NR)	Soccer	NR	Modified Peetr ons	19	5	87/0/3 /10	79/NR /NR/8 /13
Wangenstein et al.(Wangenstein, Bahr, et al. 2017)	Prospective	Qatar	132 (132/0) 31 (NR-20-49)	Sever al	High (7) and low (5)	Modified Peetr ons	12	1	92/0/0 /8	55/NR /NR/9 /36
Wangenstein et al.(Wangenstein, Tol, et al. 2017)	Prospective	Qatar	40 (40/0) 26 (NR-19-46)	Sever al	High (39) and low (1)	Modified Peetr ons / BAMI / Chan	56	5	NR/NR /NR/N R	86/NR /NR/9 /5
Wangenstein et al.(Wangenstein et al. 2018)	Prospective	Qatar	176 (176/0) 26 (5-NR-NR)	Sever al	High (173) and low (3)	Modified Peetr ons / BAMI / Chan	212	5	80/1/4 /15	23/26/ NR/NR 51

Table 1. Description of the 34 articles included in the present systematic review.

NR: Not Reported; BAMI: British Athletics Muscle Injury classification.

Some studies may have involved identical or partially identical populations, but there was no way to differentiate them, so this remains a hypothesis, which is why they were all included separately. * Professional athletes or those competing at national or international level were considered as “high level” while amateur, recreational athletes, or those competing at regional or lower levels of competition, were considered as “low level”.

**Not strictly precised but considered as one week maximum (Olympic Games).

Table 2.

Study design (n (%))	
Retrospective	8 (23.5)
Prospective	26 (76.5)
Injured population	
Age (Mean \pm SD (min - max))	
25.6 \pm 5.2 (18.8 - 36.7)	
Sex (n (%))	
Total	2773 (100%)
Men	2702 (97.4%)
Women	71 (2.6%)
Prior HMI (n (%))	
Yes	279 (25.7)
No	807 (74.3)
Sports (n (%))	
Several sports	12 (35.3)
Soccer	9 (26.5)
Australian football	5 (14.7)
Track and field	4 (11.8)
American football	3 (8.8)
Dancers	1 (2.9)
Country (n (%))	
Qatar	8 (23.5)
Sweden	7 (20.6)
Australia	6 (17.6)
USA	5 (14.7)
Netherlands	4 (11.8)
Brazil	1 (2.9)

New Zealand	1 (2.9)
Spain	1 (2.9)
England	1 (2.9)
Level (n (%))	
Low	426 (16.7)
High	2124 (83.3)
Hamstring injuries	
Number of injuries	2761
Injury size (Mean ± SD)	
Height (cm)	14.4±2.6
Length (cm)	2.4±0.7
Width (cm)	2.4±0.8
Area (cm ²)	26.8±10.6
Volume (cm ³)	89.8±27.0
Distance to ischial tuberosity	10.7±5.2
Injury Localization (%)	
Musculo-Tendinous Junction	51.9
Musculo-Aponeurotic Junction	17.9
Tendon	16.0
Muscle	13.4
Fascia	0.8
Injury Position (%)	
Proximal	34.0
Central	33.4
Distal	32.6
Mechanism (n (%))	
Sprinting	436 (55.3)
Stretching	24 (3.0)

Non sprinting	196 (24.9)
Sprinting + stretching	131 (16.6)
Undefined	1 (0.1)
Primary lesion (n (%))	
Semimembranosus	13.4
Semitendinosus	8.6
Long head biceps femoris	79.6
Short head biceps femoris	1.1

Table 2. Summary of the characteristics of the 34 studies included and of the 2761 hamstring injuries included.

BAMI: British Athletics Muscle Injury classification; SD: standard deviation; min: minimum; max: maximum. HMI: Hamstring injuries

Supplementary data

Supplementary data 1:

Database	Equation	Records
Pubmed	("hamstring" OR "hamstring muscles" OR "posterior thigh" OR "biceps femoris" OR "semitendinosus" OR "semimembranosus") AND ("imaging" OR "MRI" OR "magnetic resonance imaging") AND ("lesion" OR "injur" OR "injury" OR "injuries" OR "tear" OR "tearing" OR "damage" OR "strain" OR "strains" OR "laceration" OR "rip" OR "rent" OR "spit" OR "rupture" OR "pred" OR "caus" OR "risk factors").	1003
SPORTdiscus.	("hamstring" OR "hamstring muscles" OR "posterior thigh" OR "biceps femoris" OR "semitendinosus" OR "semimembranosus") AND ("imaging" OR "MRI" OR "magnetic resonance imaging") AND ("lesion" OR "injur" OR "injury" OR "injuries" OR "tear" OR "tearing" OR "damage" OR "strain" OR "strains" OR "laceration" OR "rip" OR "rent" OR "spit" OR "rupture" OR "pred" OR "caus" OR "risk factors").	340
Scopus	(hamstring OR hamstring muscles OR posterior thigh OR biceps femoris OR semitendinosus OR semimembranosus) AND (imaging OR MRI OR magnetic resonance imaging) AND (lesion OR injur OR injury OR injuries OR tear OR tearing OR damage OR strain OR strains OR laceration OR rip OR rent OR spit OR rupture OR pred OR caus OR risk factors)	628
Web of Science	(((((("hamstring" OR "hamstring muscles") OR "posterior thigh") OR "biceps femoris") OR "semitendinosus") OR "semimembranosus") AND (("imaging" OR "MRI") OR "magnetic resonance imaging")) AND (((((((((((("lesion" OR "injury") OR "injury") OR "injuries") OR "tear") OR "tearing") OR "damage") OR "strain") OR "strains") OR "laceration") OR "rip") OR "rent") OR "spit") OR "rupture") OR "pred") OR "caus") OR "risk factors"))	612
The Cochrane Library	("hamstring" OR "hamstring muscles" OR "posterior thigh" OR "biceps femoris" OR "semitendinosus" OR "semimembranosus") AND ("imaging" OR "MRI" OR "magnetic resonance imaging") AND ("lesion" OR "injur" OR "injury" OR "injuries" OR "tear" OR "tearing" OR "damage" OR "strain" OR "strains" OR "laceration" OR "rip" OR "rent" OR "spit" OR "rupture" OR "pred" OR "caus" OR "risk factors").	205

Supplementary data 1: Search strategy. *The literature search was performed in March 1, 2020.*

Supplementary data 2.

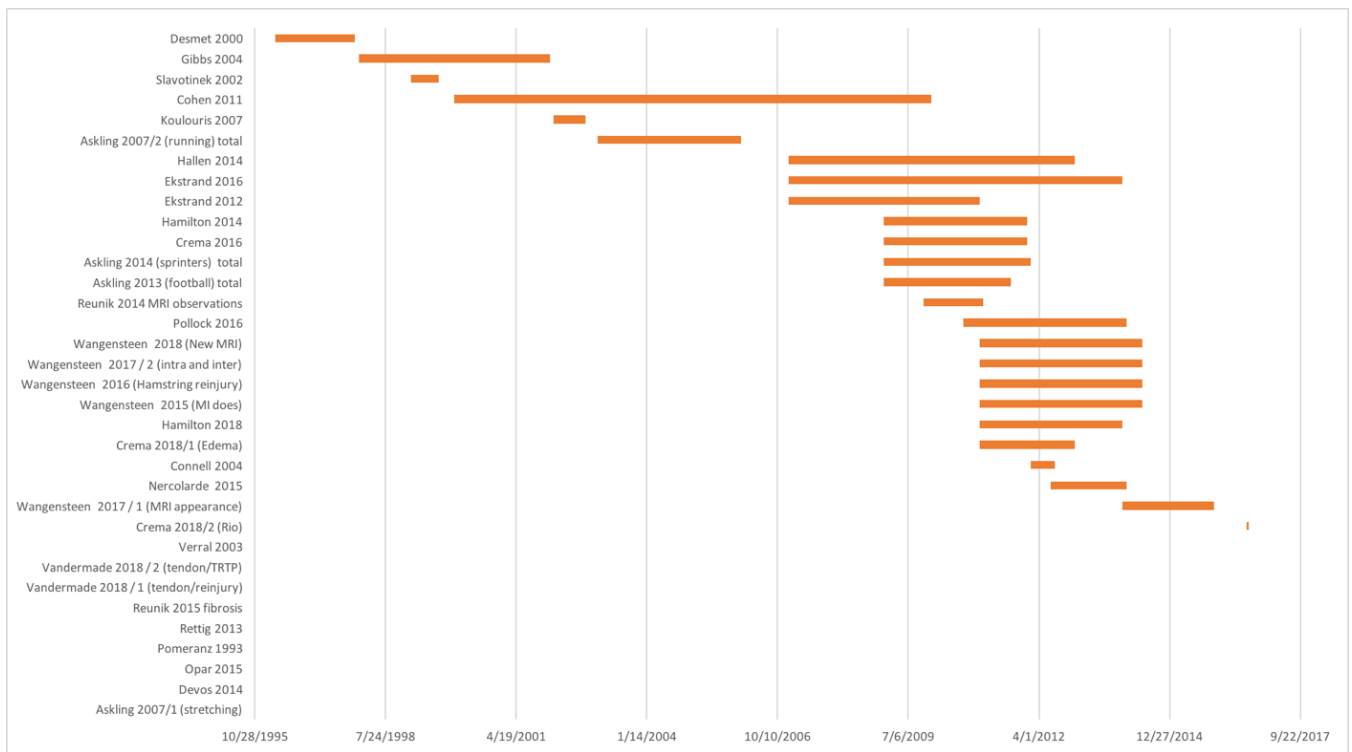
Articles	1 objective	2 study population	3 participation rate > 50%	4 Inc/Exc criteria	5 size/power	6 exposures measured before outcome	7 Sufficient exposure time	8 exposure levels	9 definition of exposure measures	10 more than one exposure	11 exposure measure definition	12 blind exposures	13 lost patients <20 %	14 confounding factors	SCORE	%
Askling 2007/1 (stretching)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Askling 2007/2 (running)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Askling 2013 (football)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Askling 2014 (sprinters)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Cohen 2011	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Connell 2004	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Crema 2016	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Crema 2018/1 (Edema)	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Crema 2018/2 (Rio)	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Desmet 2000	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Devos 2014	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	11	79%
Ekstrand 2012	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Ekstrand 2016	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Gibbs 2004	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Hallen 2014	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Hamilton 2014	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Hamilton 2018	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Koulouris 2007	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Nercolarde 2015	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Opar 2015	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Pollock 2016	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Pomeranz 1993	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Rettig 2013	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	13	93%
Reunik 2014	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Reunik 2015	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Slavotinek 2002	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%

Vandermade 2018 / 1 (injury)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Vandermade 2018 / 2 (involvement)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Verral 2003	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Wangenstein 2015 (MI does)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Wangenstein 2016 (Hamstring reinjury)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Wangenstein 2017 / 1 (MRI appearance)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Wangenstein 2017 / 2 (intra and inter)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%
Wangenstein 2018 (New MRI)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	NA	Y	Y	14	100%

Supplementary data 2. Risk of bias assessment of the 34 studies included

Y: Yes; N: No; NA: Not Applicable.

Supplementary data 3. Dates of patients' inclusion period



Supplementary data 4. Number of articles included by category of extracted data: classification, grade and location inside muscle, dimensions, antecedents and clinical mechanism, acute and chronic characteristics of the injuries (n (%)).

	Articles (n (%))		Number of injuries (n (%))	
Total	34	(100)	2761	(100)
Classifications				
Classification of location	23	(67.6)	2286	(82.8)
Classification of severity	22	(64.7)	1919	(69.5)
Location inside muscle				
Location in muscle head	32	(94.1)	1768	(64.0)
Location inside muscle	21	(61.8)	1754	(63.5)
Proximo-distal location	16	(47.1)	1122	(40.6)
Head muscle vs. inside muscle location	2	(5.9)	431	(15.6)
Multiple lesions	13	(38.2)	745	(27.0)
Dimensions				
Dimension of lesion	20	(58.8)	1338	(48.5)
Area	16	(47.1)	1333	(48.3)
Volume	10	(29.4)	665	(24.1)
Clinical data				
Sprinting/stretching mechanism	9	(26.5)	811	(29.4)
Reinjury	9	(26.5)	720	(26.1)
Return to sport	21	(61.8)	1663	(60.2)
Previous ACL graft	2	(5.9)	93	(3.4)
Characteristics of the injury				
Retraction	6	(17.6)	381	(13.8)
Fibrosis	20	(58.8)	1338	(48.5)
Chronic phenomenon	6	(17.6)	286	(10.4)
Hematoma	6	(17.6)	176	(6.4)

Supplementary data 5. Description of the main findings regarding muscle and tissue location for the two articles providing a description of these both locations

Crema et al. 2016(45)		BF	%	BFLH	%	BFSH	%	ST	%	SM	%	TO T	%
Location	MAJ All	54	20.4%	48	19.9%	6	25.0%	8	8.4%	2	3.6%	64	15.4%
	MAJ Proximal	13	4.9%	8	3.3%	5	20.8%	8	8.4%	1	1.8%	22	5.3%
	MAJ Distal	42	15.8%	41	17.0%	1	4.2%	0	0.0%	1	1.8%	43	10.3%
	MTJ All	153	57.7%	152	63.1%	1	4.2%	17	17.9%	41	73.2%	211	50.7%
	MTJ Proximal	105	39.6%	105	43.6%	0	0.0%	8	8.4%	29	51.8%	142	34.1%
	MTJ Distal	48	18.1%	47	19.5%	1	4.2%	9	9.5%	12	21.4%	69	16.6%
	Muscle all	58	21.9%	40	16.6%	18	75.0%	70	73.7%	13	23.2%	141	33.9%
	Muscle proximal	24	9.1%	15	6.2%	9	37.5%	60	63.2%	8	14.3%	92	22.1%
	Muscle distal	33	12.5%	25	10.4%	8	33.3%	10	10.5%	5	8.9%	48	11.5%
	Proximal tot	142	53.6%	128	53.1%	14	58.3%	76	80.0%	38	67.9%	256	61.5%
	Distal tot	123	46.4%	113	46.9%	10	41.7%	19	20.0%	18	32.1%	160	38.5%
	Total	265	100.0%	241	100.0%	24	100.0%	95	100.0%	56	100.0%	416	100.0%

De Smet et al. 2000(31)		BF		BFLH	%	BFSH	%	ST	%	SM	%	TOT	
Location	MAJ All	7	63.6%	7	63.6%	0	0.0%	1	33.3%	0	0.0%	8	53.3%
	MAJ Proximal	3	27.3%	3	27.3%	0	0.0%	1	33.3%	0	0.0%	4	26.7%
	MAJ Distal	4	36.4%	4	36.4%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	4	26.7%
	MTJ All	4	36.4%	4	36.4%	0	0.0%	2	66.7%	1	100.0%	7	46.7%
	MTJ Proximal	4	36.4%	4	36.4%	0	0.0%	0	0.0%	1	100.0%	5	33.3%
	MTJ Distal	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	2	66.7%	0	0.0%	2	13.3%
	Muscle all	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	Muscle proximal	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	Muscle distal	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	Proximal tot	7	63.6%	7	63.6%	0	0.0%	1	33.3%	1	100.0%	9	60.0%
	Distal tot	4	36.4%	4	36.4%	0	0.0%	2	66.7%	0	0.0%	6	40.0%
	Total	11	100.0%	11	100.0%	0	0.0%	3	100.0%	1	100.0%	15	100.0%

MAJ = myoaponeurosis junction; MTJ = myotendinous junction; BF = biceps femoris; BFLH = biceps femoris long head; BFSH = biceps femoris short head; ST = semitendinosus. SM = semimembranosus; TOT = total.

3- Discussion

Grâce à cette revue de littérature, nous avons donc exploré les caractéristiques remnographiques des lésions musculaires des ischio-jambiers, détaillant leur localisation avec pour chacune leur fréquence associée. Cela a permis de confirmer la très nette prépondérance de l'atteinte du BF parmi les muscles (70%), et de la jonction myo-tendineuse (52%) parmi la localisation tissulaire. De plus, cela a permis de montrer que la répartition proximo-distale des blessures des IJ est globalement homogène (34,0 %, 33,4 % et 32,6 %). Parallèlement, cela a permis de mettre en évidence, à travers cette revue exhaustive de la littérature, que les données extraites de l'IRM sont souvent très incomplètes et inhomogènes. Certains articles ne décrivaient qu'un ou deux paramètres, ignorant des paramètres tels que le (ou les) chef(s) musculaires concerné(s) par la lésion, le grade, les tissus, ou les données cliniques telles que le mécanisme clinique de la blessure, les dimensions précises, le sexe, le sport, les antécédents de blessures (par exemple, rupture du LCA), les blessures antérieures aux ischio-jambiers ou les phénomènes chroniques. Seuls deux articles ont décrit les chefs musculaires et les tissus impliqués dans les lésions des ischio-jambiers, mais même ces articles ont leurs limites. Le premier (Crema et al. 2016) n'a pas pris en compte les lésions du tendon ou du fascia séparément et certaines données semblent être différentes de celles généralement rapportées dans la littérature. La seconde étude (De Smet et Best 2000) n'a porté que sur 15 lésions. De plus, certains articles ne mentionnent pas si un deuxième muscle est touché, et il n'est pas possible de savoir si c'est parce qu'il n'y a pas eu de lésion secondaire ou s'ils n'ont rapporté que la lésion principale. Or, le ST est rarement touché isolément, mais il est par contre très fréquemment concerné en combinaison avec le chef long du BF, probablement en raison de leur proximité anatomique. De plus, la localisation tissulaire est souvent peu décrite, d'autant que les deux jonctions myo-tendineuses (proximale et distale) sont globalement assez étendues et souvent difficiles à différencier des jonctions aponévrotiques ; ces localisations tissulaires semblent manquer de clarté quant à leur définition spatiale dans la littérature, notamment à l'IRM afin de bien les différencier et clarifier la description de leur atteinte (étendue en terme de taille et de surface, rapport à la surface de section de muscle sain, etc...). Par ailleurs, le mécanisme lésionnel n'était reporté que dans seulement deux articles parmi les trente-quatre. Cela rend difficiles les conclusions concernant les caractéristiques particulières de la blessure des IJ en fonction du mécanisme lésionnel, comme

par exemple le mécanisme d'étirement. Cela permet de présager que l'IRM ne sera à terme plus utilisée uniquement comme un moyen de localisation, mais permettra une analyse descriptive plus poussée, et pourra contribuer, en lien avec la clinique de la blessure (douleur, mécanisme lésionnel...), à classifier en différents sous-types la lésion des ischio-jambiers et non pas comme une seule et même entité. Ainsi, une fois les lésions des ischio-jambiers considérées comme des lésions spécifiques, un diagnostic remnographique bien détaillé pourrait aider à concevoir des programmes de rééducation et de prévention spécifiques basés sur ces lésions.

C - Cohorte HAMMER : objectifs et mise en place

1- Objectifs

La revue de littérature que nous avons réalisée nous a permis de mettre en évidence les lacunes de la connaissance scientifique sur l'exploration des muscles ischio-jambiers à l'IRM. Ainsi, il nous a paru intéressant de suivre de manière prospective et détaillée les lésions musculaires des ischio-jambiers, à la fois sur le plan clinique et remnographique. Nous avons pu définir plusieurs objectifs. Le premier était de rechercher un lien entre la douleur et les données remnographiques. Le deuxième objectif était de rechercher un lien entre les différents types de mécanisme lésionnel clinique de la blessure avec les caractéristiques remnographiques. Le troisième objectif était de rechercher un lien entre les récurrences de blessure des IJ et les données cliniques et remnographiques.

2- Mise en place de la cohorte

Afin de pouvoir répondre à ces différents objectifs, nous avons réalisé une étude prospective de cohorte de patients blessés aux IJ, associant un recueil systématique des données cliniques par questionnaire, et une exploration exhaustive en IRM. Nous avons donc mis en place une étude prospective multicentrique, non interventionnelle, intitulé « HAMMER », acronyme de « HAMstring MEchanics and mRi », soit « exploration du lien entre le mécanisme clinique de la blessure des ischio-jambiers et les caractéristiques IRM ». Cette étude consistait, d'une part, en la réalisation d'une IRM des deux cuisses chez un patient qui présentait une suspicion clinique de lésion musculaire des ischio-jambiers et, d'autre part, au remplissage d'un auto-questionnaire par le patient décrivant les circonstances et le mécanisme de sa blessure (Annexe 3). Les patients inclus dans la cohorte HAMMER étaient recrutés dans deux centres de Radiologie : la clinique mutualiste et le Centre Hospitalo-Universitaire de Saint-Étienne. Les patients avaient été adressés soit par leur médecin traitant ou par un médecin du sport pour réaliser une IRM de la cuisse, devant une suspicion clinique de lésion musculaire des ischio-jambiers, survenue dans la pratique sportive. Les critères d'inclusion étaient les suivants : sportifs de loisir/amateurs, de haut-niveau ou professionnels, âgés de 18 à 50 ans, adressés par leur médecin traitant ou leur médecin du sport dans une structure d'imagerie médicale pour la réalisation d'une IRM de la cuisse devant la suspicion d'une lésion aiguë des muscles

ischio-jambiers survenue lors de la pratique sportive, datant de moins de 21 jours. Les critères d'exclusion étaient les suivants : antécédent de chirurgie du ligament croisé antérieur (LCA) avec prélèvement d'un tendon des ischio-jambiers, une lésion des ischio-jambiers survenue en dehors de la pratique sportive, un âge supérieur à 50 ans, une incapacité à comprendre la langue française. Le Comité de protection des personnes d'Île-de-France V (CPP IDF 5 : 17059) avait approuvé le protocole de l'étude (No ID-RBC : 2017-A03433-50). La lésion initiale musculaire des ischio-jambiers (« index injury ») était définie par une douleur aiguë de la loge postérieure de la cuisse, d'origine traumatique ou liée à une sollicitation excessive du groupe musculaire des ischio-jambiers. Concernant les données cliniques, lors de la réalisation de l'IRM, il était demandé au patient de remplir un auto-questionnaire (Annexe 3) comportant ses caractéristiques physiques (âge, poids, taille) et sportives (niveau, type de sport pratiqué) et de décrire les circonstances de survenue de la blessure, notamment le mécanisme lésionnel ayant entraîné la lésion des ischio-jambiers (course, étirement, saut, autre mécanisme). L'IRM pratiquée pour l'Index Injury (HAMMER) devait se dérouler dans un délai de 21 jours maximum après la survenue de la lésion. Pour que les patients soient inclus dans l'étude, il était nécessaire que l'IRM ait été faite sur des machines datant de moins de 5 ans et avec un champ magnétique de 1,5 T minimum. Des séquences en coupes axiales et coronales en pondération T1 et T2 devaient avoir été réalisées. Le champ de vue devait couvrir l'insertion proximale musculo-tendineuse au niveau de la tubérosité ischiatique ainsi que l'insertion distale au niveau de la tête de la fibula et l'extrémité proximale du tibia. L'épaisseur de coupe pour les différentes séquences devait être de 5 mm. Le même radiologue sénior a interprété l'ensemble des différentes IRM réalisées lors des vacances d'imagerie du centre de radiologie de la clinique mutualiste ou de l'hôpital Nord, et remplissait à la fin un questionnaire « radiologue » décrivant la sémiologie radiologique IRM de la lésion des ischio-jambiers et leur topographie. Les principales données recueillies étaient : le nombre de muscles atteints (de 0 à 4), le nom du muscle ayant la lésion principale : biceps fémoral (BF), semi tendineux (ST) ou semi-membraneux (SM), la structure anatomique atteinte (jonction myotendineuse (JMT), Jonction Myo-Aponévrotique (JMA), intra-tendineuse (IT), musculaire seul (M) ; le volume de lésion (en cm³). Pour classer la sévérité des lésions en IRM, la classification modifiée de Peetrons (Peetrons 2002a) et la BAMIC (Patel et al. 2015) ont été utilisées (Annexe 1). La distance entre la tubérosité ischiatique (insertion tendineuse proximale) et le centre de la

lésion des ischio-jambiers était mesurée en centimètre afin de classer les lésions selon trois topographies différentes : tiers proximal, tiers moyen et tiers distal, seules ou associés. Initialement, les séquences utilisées étaient les séquences cliniques standards (T1 axial, T2FatSat axial et coronal), mais avec une exploration exhaustive du volume musculaire des IJ sur chacune des séquences, ce qui n'est pas forcément réalisé en pratique clinique courante. Afin de pouvoir mettre en place un algorithme de délimitation non supervisé, il était nécessaire de pouvoir réaliser des segmentations manuelles les plus fines possibles. Nous avons donc ajouté à ce protocole standard des séquences tridimensionnelles en T1 Dixon. Les paramètres des séquences du protocole HAMMER sont présentés en Annexe 4.

D - Lien entre la douleur et les données IRM

1- Objectifs

La douleur est le symptôme le plus souvent rapporté par les sportifs blessés, et est facilement évalué par l'interrogatoire et l'examen clinique. Après une blessure aux ischio-jambiers, les principales questions du sportif blessé concernent les conséquences sur les performances, le risque de récurrence et le temps nécessaire pour reprendre le sport. Les réponses à ces questions sont importantes pour planifier et anticiper le processus de reprise du sport dans les meilleures conditions. Pour ce faire, il est tout d'abord nécessaire de confirmer la lésion des ischio-jambiers et ses caractéristiques. Cette évaluation se fait bien sûr d'abord cliniquement, mais aussi souvent par l'utilisation de l'imagerie médicale. Dans ce processus, la place de l'IRM est souvent débattue. La sélection des patients pour lesquels l'imagerie apporte une valeur ajoutée à la prise en charge semble être une question primordiale. L'examen clinique peut être utile, en particulier l'évaluation de la douleur au moment de la blessure. Il semble donc particulièrement intéressant d'étudier si l'intensité de la douleur est liée aux lésions anatomiques. Cela permettrait de déterminer si l'intensité de la douleur au moment de la blessure est une information pertinente pour aider à la prise de décision concernant la prescription d'une IRM après une lésion des muscles ischio-jambiers. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude était d'analyser la corrélation entre la douleur ressentie au moment de la blessure aux IJ et le volume de la lésion mesurée à l'IRM, grâce à l'hypersignal T2 de la lésion musculaire. Nous avons émis l'hypothèse que la douleur ressentie par le patient au moment de la blessure est corrélée à ce volume. Les objectifs secondaires étaient de mettre en évidence un éventuel lien à la fois entre la douleur et le grade de la lésion selon la classification de Peetrons, mais aussi entre la douleur et le chef musculaire des ischio-jambiers concerné.

2- Article « HAMMER PAIN »

“Relationship between the pain intensity at the time of the hamstring muscle injury and the hyperintense T2-weight volume of the hamstring muscle lesion measured by MRI.”

Short title: Pain intensity and hamstring muscle lesion measured by MRI.

Sylvain Grange, Ronan Plancher, Gustaav Reurink, Pierre Croisille, Pascal Edouard

Article soumis

Acknowledgments: Dr Clément Foschia for recruiting the patients in the study.

Word counts: 2312

Figures/Tables: 5

References: 35

Abbreviations: MRI (Magnetic Resonance Imaging); BFLH (Biceps Femoris Long Head); BFSH (Biceps Femoris Short Head); Semi-Tendinosous (ST); Semi-Membranosous (SM); Hamstring Muscle Injury (HMI); Numeric Pain Rating Scale (NPRS); Body Mass Index (BMI); Time to return to sport (TRTS).

Abstract:

Objectives. The primary objective of this study was to analyze the correlation between the pain experienced at the time of a hamstring muscle injury and the hyperintense T2-weight volume of the lesion measured on MRI. The secondary objectives were to analyze the differences in this pain with the lesion grade as well as the hamstring muscle head involved. **Design.** We performed a retrospective analysis of the data collected in a prospective, multicenter, non-interventional cohort study (HAMMER). **Patients.** A total of 61 patients were included in the present analysis. **Interventions.** Patients with suspected hamstring muscle injury had an MRI after the injury. **Main outcomes measures.** They were evaluated for their pain intensity experienced at the time of the injury with a Numerical Pain Rating Scale (NPRS) from 0 to 10. **Results.** There was a significant but weak correlation between the pain experienced at the time of the hamstring muscle injury and the hyperintense T2-weight volume ($r=0.287$; $p=0.025$). There were no significant differences in the pain according to the lesion grade ($F(3,57)=0,982$; $p=0.408$) nor according to the muscle involved ($F(3,57)=1.013$; $p=0.394$). **Conclusions.** Pain at the time of injury appeared to be weakly correlated with the extent of muscle lesion at medical imaging. Pain at the time of injury alone seems not enough to give us a clinical meaningful indication of the MRI hyperintense T2-weighted volume.

Keywords: Hamstring muscle injury; Oedema; MRI; Extent lesion; Pain.

1. Introduction

Hamstring muscle injury is the most frequent injury in sports requiring sprints and acceleration such as soccer(Diemer et al. 2021; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011), American football(Mack et al. 2020), Australian football(Orchard et Seward 2002), rugby(Williams et al. 2013), hockey(Rees et al. 2021) and Track and Field(Edouard et al. 2021b; Edouard, Branco, et Alonso 2016a). This non-contact injury leads to important physical, psychological, economic and social consequences(Edouard, Branco, et Alonso 2016a; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011; Fitzpatrick et al. 2018; Martin Hägglund et al. 2013; J. Hickey et al. 2014a). Improving its management thus represents an important challenge for all stakeholders around the athletes.

After a hamstring injury, main questions are about its consequences on performance, its risk of recurrence, and the time needed to return to sport. Responses to these questions are important to plan/anticipate the process of returning to sport in the best conditions. To do this, there is first a need to confirm the hamstring injury and their characteristics. This evaluation is of course first done clinically, but also often by the use of medical imaging. In this process, the place of MRI is often debated (Ekstrand et al. 2012; Bruce Hamilton et al. 2018; G. Reurink, Whiteley, et Tol 2015; Gustaaf Reurink, Brilman, et al. 2015; Wangensteen et al. 2015, 2018). Selecting patients for whom imaging adds value to the management seems to be a primary issue. The clinical examination could be of help, especially the evaluation of the pain at the time of injury (Guillodo et al. 2014; Jacobsen et al. 2016). Pain is the most reported symptoms from the injured athlete (Sciascia, Waldecker, et Jacobs 2020). It seems therefore of particular interest to explore whether pain intensity would be related to anatomical damage. This would help to determine if the pain intensity at the time of the injury would be a relevant information to help in the decision-making process of the MRI prescription after hamstring muscle injuries.

A muscle injury is the consequence of a stress or strain of the muscle tissue higher than its strength, which thus can lead to tissue damage (Beltran et al. 2012b; Linklater et al. 2010; Pollock et al. 2021). This tissue damage can vary from oedema to tissue rupture and can involve different structures of the muscle (myofibrils, tendons and aponeuroses) (Beltran et al. 2012b). The destruction of intra-cellular structures (destruction of sarcomeres by the influx of calcium) and extra-cellular structures initiates the inflammatory response process and triggers the pain (Souza et Gottfried 2013). At the level of the muscles, there are mechanical or chemical (or plurimodal) nociceptors. Mechanical nociceptors are activated by the stretching of the fibers and their rupture: they are the first receptors activated and integrated at the cerebral level (Millan 1999). Chemical nociceptors are activated by the release of inflammatory substances such as bradykinins, prostaglandins, histamine, serotonin and potassium ions (Besson 1997). They are particularly sensitive to concentrations of adenosine triphosphate (ATP) molecules (purinergic receptors) and to pH lowering (vanilloid receptors). We can therefore assume that the greater the muscle injury size, the more ATP molecules and

H⁺ ions are released into the extracellular medium, consequently, the greater is the painful stimulus(Mense 2003). These pathophysiological elements suggest that muscle tissue damage seems correlated to the pain stimulus. Besides the clinical aspect, MRI is a commonly used examination in routine. It has shown a high sensitivity and seems not to be operator dependent(Wangenstein, Tol, et al. 2017). The T2 sequence allows the detection of tendino-ligamentary and muscular lesions by highlighting the edematous and fluidic signal caused by the muscular injuries. It seems quite logical to suggest that the greater the pain associated with the injury, the greater the size of the injury visible in T2 hypersignal on MRI. Such information would be of great interest for the clinicians to know if they can use the clinical symptom of pain to estimate hamstring injury extent/size, and then can help to determine the interest of a medical imaging such as MRI.

In this context, the primary objective of this study was to analyze the correlation between the pain experienced at the time of a hamstring muscle injury and the hyperintense T2-weight volume of the lesion measured on MRI. We hypothesized that the pain experienced by the patient at the time of injury is correlated with the MRI hyperintense T2-weight volume. Secondary objectives were to analyze the differences in this pain with the lesion grade using the Peetrons' classification or the hamstring muscle head involved (biceps femoris muscle long head (BFLH), biceps femoris muscle short head (BFSH), semitendinosus muscle (ST), and semimembranosus muscle (SM)).

2. Methods

2.1. Experimental protocol

We performed a retrospective analysis of data collected in the HAMMER (acronym for HAMstring MEchanics and mRi) study, a prospective, multicenter, noninterventional cohort study. The HAMMER study consisted in performing a thigh MRI in patients with a clinical suspicion of a hamstring muscle injury associated with a self-questionnaire completed by the patient describing the circumstances and mechanism of his injury. The HAMMER study received ethic approval from the Comité de Protection des Personnes d'Île-de-France V (CPP IDF 5: 17059; N° ID-RBC; 2017-A03433-50). In the present study, we used MRI data (extent and grade of injury, muscle(s) involved) with measurement of pain by the numerical pain

rating scale (NPRS) from 0 to 10 experienced by the patient at the time of the injury collected in the self-reported questionnaire.

2.2. Population

The patients were recruited in two radiology centers: the university hospital of Saint-Etienne and the mutualist clinic of Saint-Etienne. The patients were referred by their attending physician or by sports physician for MRI of the thigh following the suspicion of a hamstring muscle injury occurring during sports practice. The inclusion criteria were: recreational/amateur, high-level or professional athletes, aged 18 to 50 years, referred by their attending physician or their sports physician to a medical imaging facility for an MRI of the thigh in the context of a suspected acute hamstring muscle injury occurring during sports practice (physicians' diagnosis was made clinically (history and examination) without any recommendations), and dating back less than 21 days. Exclusion criteria were: age less than 18 years and more than 50 years, inability to understand the French language.

2.3. Data collection

MRIs were performed on 1.5 or 3T clinical MR units. The axial and coronal sequences were performed using T1 and T2 weighted sequences with fat saturation. Parameters are available in Supplementary material 1. The musculotendinous insertion proximal to the ischial tuberosity, the insertions distal to the head of the fibula, and the proximal end of the tibia should be included in the field of view.

An acute hamstring injury was considered if high signal intensity was observed on T2-weighted MRI images, as compared with that of the uninjured side, reflecting edema in or around the muscle. Images of chronic tendinopathy or chronic lesion (such as fibrosis) were not considered acute hamstring injuries. The extent of the MRI lesion was defined as any hyperintensity change at fluid sensitive sequences of musculo-aponeurotic and tendon structures (i.e., hyperintense T2-weight)(Wangenstein et al. 2018). Signal changes between fascia were not considered as part of the lesion (i.e., the effusion between the fascia, example given in fig 1)(Wangenstein et al. 2018). The size of the lesion was obtained using a prolate spheroid volume modeling, calculated from the three maximal dimensions of the lesion (Geirsson, Christie, et Patel 1982b). An example of a MRI of a hamstring muscle injury with

measurement of the three major axes of the injury allowing calculation of the hyperintense T2-weight volume is shown in figure 1. The hamstring muscle head involved (BFLH, BFSH, ST, SM) was noted, and the “primary lesion” was defined as the muscle lesion with the largest hyperintense T2-weight volume. Lesion grade was reported according to the Peetrans’ classification with four grades from 0 to 3 (Peetrans 2002b). All the data were collected by the same radiologist specialized in musculoskeletal imaging (SG).

At the end of the imaging examination, a self-reported questionnaire was given to the patient with questions about their physical characteristics (height, weight, age), their personal history of injury, their current sports practice and the circumstances of the injury including the pain at the time of the injury measured with the Numeric Pain Rating Scale (NPRS).

2.4. Statistical analysis

Descriptive statistics was provided as count and percentage for categorical data and mean and standard deviation (SD), as well as a minimum and maximum, for the continuous variables. Correlation between the pain at the time of the hamstring injury and the hyperintense T2-weight volume were provided by using the Pearson correlation. The differences in this pain at the time of the hamstring injury with the lesion grade using the Peetrans’ classification (0, 1, 2, 3) or the hamstring muscle head involved (BFLH, BFSH, ST, SM) were analysed using an one-way ANOVA. Statistical analyses were performed using JASP (JASP Team software, Version 0.14.1, University of Amsterdam, Netherlands). The level of statistical significance was set at $p < 0.05$

3. Results

Population

From February 2018 to June 2021, we included 61 patients that were referred for hamstring MRI at the two radiology centers in Saint-Etienne and were included in the study. The main sports played were soccer (39%) and Track and Field (34%). A majority of patients had a previous hamstring muscle injury (61%). The physical and demographic characteristics of the population are presented in table 1.

Hamstring muscle injuries

The mean delay between the day of injury and MRI was 7.8 ± 5.7 days; 79% were performed less than or equal to 10 days after injury). The majority of patients had a single lesion (81%). Most of the primary lesions affected the BFLH (61%), were located in the central part of the muscles (46%), and were grade 2 according to the Peetrans classification (60%). The main MRI characteristics of the hamstring injuries are represented in table 1.

3.3 Analysis of the pain intensity, the lesion grade and the hamstring muscle involved, with the hyperintense T2-weight volume

There was a weak positive correlation between the pain at the time of injury and the MRI hyperintense T2-weight volume ($p < 0.05$ $R = 0.287$) (figure 2). There were no significant differences in the pain according to the lesion grade ($F(3,57) = 0.982$; $p = 0.408$) (figure 3) nor according to the muscle involved ($F(3,57) = 1.013$; $p = 0.394$) (figure 4).

4. Discussion

The main findings of the present study were that 1) there was a significant but weak correlation between the pain intensity at the time of injury and the MRI hyperintense T2-weight volume, and 2) there was no significant differences between this pain and the lesion grade or the affected muscle.

Our results reported that the pain at the time of injury appeared to be weakly correlated with the extent of muscle lesion at medical imaging. This weak correlation is consistent with pathophysiological considerations: the greater the reactional oedema, the more pain is triggered (Beltran et al. 2012b; Besson 1997; Linklater et al. 2010; Millan 1999; Pollock et al. 2021; Souza et Gottfried 2013). However, although the correlation was significant, our results indicated that only 8% (r^2) of the variance in extent of oedema on MRI was explained by the pain experienced at the time of the injury. Pain at the time of injury alone seems not enough to give us a clinical meaningful indication of the MRI hyperintense T2-weighted volume. This information could be of help in clinical practice for determining the need of imaging and to

manage injury. Indeed, if we need to know the extent of the MRI hyperintense T2-weighted volume, a MRI is needed.

The potential clinical applications of the present results could be that the pain at the time of the injury can be of help to orient the decision-making for MRI. For patients with minimal initial pain, we can expect a small MRI hyperintense T2-weighted volume. In such case, MRI could be of interest to confirm the fact that there is no tissue damage, and thus not to treat abusively the patient. Or at the inverse, to confirm the tissue damage and not to neglect the pain experienced by the patient. Conversely, in case of substantial pain, we can expect to see a more extensive MRI hyperintense T2-weighted volume. In these cases, MRI would seem to be desirable to carry out an assessment of the severity of the injury, in particular to look for a hematoma or even a tendon rupture, the management of which is different and may lead to a discussion of a puncture or a surgical decision, respectively(Macdonald et al. 2019). However, given our results reporting a weak correlation, it is important to note that if we need to know the extent of the MRI hyperintense T2-weighted volume, a MRI is needed.

As strengths of the present study, we can report that the characteristic of patients included in this study appear to be consistent with the literature(Grange et al. 2022), notably the predominance of isolated damage to a single muscle, predominance of BFLH and grade 2 lesion according to the Peetrans' classification. Furthermore, this study is one of the few to analyze an anatomic-clinical relationship between a simple clinical examination parameter (pain at the time of injury) and an MRI parameter (injury extent) in hamstring injuries.

Some limitations of our present study have to be acknowledged. We can consider our patient sample to be small compared to some cohorts in the literature(Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Martin Hägglund et al. 2013). In our study, the pain assessment was performed retrospectively, which may lead to recall bias, but the short delay after MRI (7.8 ± 5.7 days, ranging from 1 to 24) could have limited this bias. Furthermore, pain is a subjective data whose evaluation remains variable between different individuals according to cultural factors, fatigue and the emotional and psychological state in which the patient is(Constantin-Teodosiu et Constantin 2021; Williamson et Hoggart 2005). More, our study evaluates only one clinical

examination parameter (i.e., the pain). Other clinical examination parameters should be explored in future studies (e.g., pain during hamstring mobilization maneuvers, flexibility, strength). In addition, the combination of the initial pain and other clinical criteria could allow better optimization of the selection of patients eligible or not for MRI.

5. Conclusion

Our results reported a weak correlation between a simple clinical examination parameter (the pain at the time of the injury) and an MRI parameter (the MRI hyperintense T2-weight volume). This is consistent with an anatomical-clinical relationship, however pain at the time of injury alone only explained 8% (r^2) of the variance in extent of oedema on MRI, and thus seems not enough to give us a clinical meaningful indication of the MRI hyperintense T2-weighted volume. This information could be of help in clinical practice for determining the need of imaging and to manage injury. Indeed, if we need to know the extent of the MRI hyperintense T2-weighted volume, a MRI is needed.

References

- Agosti, Abramo et al. 2021. « Deep Learning for Automatic Segmentation of Thigh and Leg Muscles ». *Magma (New York, N.Y.)*.
- Albu, Alexandra Branzan, Trevor Beugeling, et Denis Laurendeau. 2008. « A Morphology-Based Approach for Interslice Interpolation of Anatomical Slices from Volumetric Images ». *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55(8): 2022-38.
- Asakawa, Deanna S., Silvia S. Blemker, Garry E. Gold, et Scott L. Delp. 2002. « In Vivo Motion of the Rectus Femoris Muscle after Tendon Transfer Surgery ». *Journal of Biomechanics* 35(8): 1029-37.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Tõnu Saartok, et Alf Thorstensson. 2007a. « Acute First-Time Hamstring Strains during High-Speed Running: A Longitudinal Study Including Clinical and Magnetic Resonance Imaging Findings ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(2): 197-206.
- . 2007b. « Acute First-Time Hamstring Strains during Slow-Speed Stretching: Clinical, Magnetic Resonance Imaging, and Recovery Characteristics ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(10): 1716-24.

- . 2008. « Proximal Hamstring Strains of Stretching Type in Different Sports: Injury Situations, Clinical and Magnetic Resonance Imaging Characteristics, and Return to Sport ». *The American Journal of Sports Medicine* 36(9): 1799-1804.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Olga Tarassova, et Alf Thorstensson. 2014. « Acute Hamstring Injuries in Swedish Elite Sprinters and Jumpers: A Prospective Randomised Controlled Clinical Trial Comparing Two Rehabilitation Protocols ». *British Journal of Sports Medicine* 48(7): 532-39.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, et Alf Thorstensson. 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): 953-59.
- Balius, Ramon et al. 2019. « Sonographic Landmarks in Hamstring Muscles ». *Skeletal Radiology* 48(11): 1675-83.
- Barnouin, Yoann et al. 2014. « Manual Segmentation of Individual Muscles of the Quadriceps Femoris Using MRI: A Reappraisal ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 40(1): 239-47.
- Baron, Jacqueline E., Emily A. Parker, Kyle R. Duchman, et Robert W. Westermann. 2020. « Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8(6): 2325967120930296.
- Baumgart, Christian et al. 2021. « Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(16): 8727.
- Becciolini, Marco, Giovanni Bonacchi, et Stefano Bianchi. 2019. « Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine* 38(5): 1367-82.
- Behan, Fearghal P., Thomas M. Maden-Wilkinson, Matt T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2018. « Sex Differences in Muscle Morphology of the Knee Flexors and Knee Extensors ». *PLoS One* 13(1): e0190903.
- van Beijsterveldt, A. M. C., I. G. L. van de Port, A. J. Vereijken, et F. J. G. Backx. 2013. « Risk Factors for Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Systematic Review of Prospective Studies ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23(3): 253-62.
- Beltran, Luis, Varand Ghazikhanian, Mario Padron, et Javier Beltran. 2012a. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- . 2012b. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- Besson, J. M. 1997. « [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain] ». *Drugs* 53 Suppl 2: 1-9.

- Birchmeier, Thomas et al. 2020. « Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 38(3): 598-608.
- Bland, J. M., et D. G. Altman. 1986. « Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement ». *Lancet (London, England)* 1(8476): 307-10.
- Bourne, M. N. et al. 2016. « Muscle Activation Patterns in the Nordic Hamstring Exercise: Impact of Prior Strain Injury ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(6): 666-74.
- Brandser, E. A. et al. 1995. « Hamstring Injuries: Radiographic, Conventional Tomographic, CT, and MR Imaging Characteristics ». *Radiology* 197(1): 257-62.
- Brooks, J. H. M., C. W. Fuller, S. P. T. Kemp, et D. B. Reddin. 2005. « A Prospective Study of Injuries and Training amongst the England 2003 Rugby World Cup Squad ». *British Journal of Sports Medicine* 39(5): 288-93.
- Brooks, John H. M., Colin W. Fuller, Simon P. T. Kemp, et Dave B. Reddin. 2006. « Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(8): 1297-1306.
- Buckthorpe, Matthew et al. 2021. « Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(4): 607-24.
- Campbell, Scot E., Ronald Adler, et Carolyn M. Sofka. 2005. « Ultrasound of Muscle Abnormalities ». *Ultrasound Quarterly* 21(2): 87-94; quiz 150, 153-54.
- Chan, Otto, Angelo Del Buono, Thomas M. Best, et Nicola Maffulli. 2012. « Acute Muscle Strain Injuries: A Proposed New Classification System ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 20(11): 2356-62.
- Chang, Justin S. et al. 2020. « Management of Hamstring Injuries: Current Concepts Review ». *The Bone & Joint Journal* 102-B(10): 1281-88.
- Cohen, Steven B. et al. 2011. « Hamstring Injuries in Professional Football Players: Magnetic Resonance Imaging Correlation with Return to Play ». *Sports Health* 3(5): 423-30.
- Connell, David A. et al. 2004. « Longitudinal Study Comparing Sonographic and MRI Assessments of Acute and Healing Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 183(4): 975-84.
- Constantin-Teodosiu, Dumitru, et Despina Constantin. 2021. « Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *International Journal of Molecular Sciences* 22(21): 11587.
- Crema, Michel D. et al. 2015. « Imaging Techniques for Muscle Injury in Sports Medicine and Clinical Relevance ». *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 8(2): 154-61.
- . 2016. « Acute Hamstring Injury in Football Players: Association between Anatomical Location and Extent of Injury-A Large Single-Center MRI Report ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19(4): 317-22.
- Crema, Michel D., Ivan R. B. Godoy, et al. 2018. « Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play ». *Sports Health* 10(1): 75-79.

- Crema, Michel D., Mohamed Jarraya, et al. 2018a. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- . 2018b. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- Dalton, Sara L., Zachary Y. Kerr, et Thomas P. Dompier. 2015. « Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(11): 2671-79.
- Danielsson, Adam et al. 2020. « The Mechanism of Hamstring Injuries - a Systematic Review ». *BMC musculoskeletal disorders* 21(1): 641.
- De Smet, A. A., et T. M. Best. 2000. « MR Imaging of the Distribution and Location of Acute Hamstring Injuries in Athletes ». *AJR. American journal of roentgenology* 174(2): 393-99.
- De Smet, AA, et TM Best. 2000. « MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes ». *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY* 174(2): 393-99.
- De Vos, Robert-Jan et al. 2014. « Clinical Findings Just after Return to Play Predict Hamstring Re-Injury, but Baseline MRI Findings Do Not ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1377-84.
- Delvaux, François et al. 2014. « Return-to-Play Criteria after Hamstring Injury: Actual Medicine Practice in Professional Soccer Teams ». *Journal of Sports Science & Medicine* 13(3): 721-23.
- Dictionnaire Larousse.*
- Diemer, Willemijn M. et al. 2021. « Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million Sport Exposure Hours ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 51(1): 27-36.
- Dorn, Tim W., Anthony G. Schache, et Marcus G. Pandy. 2012. « Muscular Strategy Shift in Human Running: Dependence of Running Speed on Hip and Ankle Muscle Performance ». *The Journal of Experimental Biology* 215(Pt 11): 1944-56.
- Dunlop, Gordon et al. 2020. « Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 50(4): 829-40.
- Edouard, Pascal et al. 2021a. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport*.
- . 2021b. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 24(7): 653-59.
- Edouard, Pascal, Pedro Branco, et Juan-Manuel Alonso. 2016a. « 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): 619-30.

- . 2016b. « 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): 619-30.
- Ekstrand, Jan et al. 2012. « Hamstring Muscle Injuries in Professional Football: The Correlation of MRI Findings with Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 46(2): 112-17.
- . 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): 292-98.
- Ekstrand, Jan, Martin Häggglund, et Markus Waldén. 2011. « Epidemiology of Muscle Injuries in Professional Football (Soccer) ». *The American Journal of Sports Medicine* 39(6): 1226-32.
- Ekstrand, Jan, Justin C. Lee, et Jeremiah C. Healy. 2016. « MRI Findings and Return to Play in Football: A Prospective Analysis of 255 Hamstring Injuries in the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 738-43.
- Ekstrand, Jan, Armin Spreco, Håkan Bengtsson, et Roald Bahr. 2021a. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- . 2021b. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Ekstrand, Jan, Markus Waldén, et Martin Häggglund. 2016. « Hamstring Injuries Have Increased by 4% Annually in Men's Professional Football, since 2001: A 13-Year Longitudinal Analysis of the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 731-37.
- Evangelidis, Pavlos E., Garry J. Massey, Matthew T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2016. « Strength and Size Relationships of the Quadriceps and Hamstrings with Special Reference to Reciprocal Muscle Balance ». *European Journal of Applied Physiology* 116(3): 593-600.
- Farrow, M. et al. 2021. « Quantitative MRI in Myositis Patients: Comparison with Healthy Volunteers and Radiological Visual Assessment ». *Clinical Radiology* 76(1): 81.e1-81.e10.
- Fedorov, Andriy et al. 2012. « 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network ». *Magnetic Resonance Imaging* 30(9): 1323-41.
- Fitzpatrick, Anna C., Adam S. Naylor, Peter Myler, et Colin Robertson. 2018. « A Three-Year Epidemiological Prospective Cohort Study of Rugby League Match Injuries from the European Super League ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21(2): 160-65.
- Fletcher, Amanda N., Jonathan W. Cheah, Shane J. Nho, et Richard C. Mather. 2021. « Proximal Hamstring Injuries ». *Clinics in Sports Medicine* 40(2): 339-61.
- Flores, Dyan V. et al. 2018. « MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 38(1): 124-48.

- Franchi, M. V. et al. 2014a. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- . 2014b. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- Francis, Peter et al. 2017. « Measurement of Muscle Health in Aging ». *Biogerontology* 18(6): 901-11.
- Freckleton, Grant, et Tania Pizzari. 2013. « Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 47(6): 351-58.
- Fried, T., et G. J. Lloyd. 1992. « An Overview of Common Soccer Injuries. Management and Prevention ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 14(4): 269-75.
- Frouin, Antoine et al. 2023. « Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes ». *Ultrasound in Medicine & Biology: S0301-5629(23)00064-9*.
- Fukunaga, T. et al. 2001. « Muscle Volume Is a Major Determinant of Joint Torque in Humans ». *Acta Physiologica Scandinavica* 172(4): 249-55.
- Gabbe, B. J. et al. 2006. « Predictors of Hamstring Injury at the Elite Level of Australian Football ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 16(1): 7-13.
- Geirsson, R. T., A. D. Christie, et N. Patel. 1982a. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- . 1982b. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- Gibbs, N. J., T. M. Cross, M. Cameron, et M. T. Houang. 2004. « The Accuracy of MRI in Predicting Recovery and Recurrence of Acute Grade One Hamstring Muscle Strains within the Same Season in Australian Rules Football Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 7(2): 248-58.
- Gibby, Wendell A. 2005. « Basic Principles of Magnetic Resonance Imaging ». *Neurosurgery Clinics of North America* 16(1): 1-64.
- Gouttebauge, Vincent, Brendan A. Hughes Schwab, Adam Vivian, et Gino M M J Kerkhoffs. 2016. « Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(1): e31385.
- Grange, Sylvain et al. 2022. « Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review ». *Sports Health: 19417381211071010*.
- Gray, Calum et al. 2011. « Magnetic Resonance Imaging with K-Means Clustering Objectively Measures Whole Muscle Volume Compartments in Sarcopenia/Cancer Cachexia ». *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)* 30(1): 106-11.

- Gronwald, Thomas et al. 2022. « Hamstring Injury Patterns in Professional Male Football (Soccer): A Systematic Video Analysis of 52 Cases ». *British Journal of Sports Medicine* 56(3): 165-71.
- Guerini, Henri et al. 2015. « Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 19(4): 335-47.
- Guillodo, Yannick et al. 2014. « Clinical Predictors of Time to Return to Competition Following Hamstring Injuries ». *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 4(3): 386-90.
- Häggglund, M., M. Waldén, et J. Ekstrand. 2006. « Previous Injury as a Risk Factor for Injury in Elite Football: A Prospective Study over Two Consecutive Seasons ». *British Journal of Sports Medicine* 40(9): 767-72.
- Häggglund, Martin et al. 2013. « Injuries Affect Team Performance Negatively in Professional Football: An 11-Year Follow-up of the UEFA Champions League Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 47(12): 738-42.
- Hallén, Anna, et Jan Ekstrand. 2014. « Return to Play Following Muscle Injuries in Professional Footballers ». *Journal of Sports Sciences* 32(13): 1229-36.
- Hamilton, B. et al. 2014. « Excellent Reliability for MRI Grading and Prognostic Parameters in Acute Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1385-87.
- Hamilton, Bruce et al. 2018. « Cohen's MRI Scoring System Has Limited Value in Predicting Return to Play ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 26(4): 1288-94.
- Hayden, Jill A., Pierre Côté, et Claire Bombardier. 2006. « Evaluation of the Quality of Prognosis Studies in Systematic Reviews ». *Annals of Internal Medicine* 144(6): 427-37.
- Hegyí, A., A. Péter, T. Finni, et N. J. Cronin. 2018. « Region-Dependent Hamstrings Activity in Nordic Hamstring Exercise and Stiff-Leg Deadlift Defined with High-Density Electromyography ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 28(3): 992-1000.
- van Heumen, Moniek et al. 2017. « The Prognostic Value of MRI in Determining Reinjury Risk Following Acute Hamstring Injury: A Systematic Review ». *British Journal of Sports Medicine* 51(18): 1355-63.
- Hickey, Jack, Anthony J. Shield, Morgan D. Williams, et David A. Opar. 2014a. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- . 2014b. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- Hickey, Jack T., David A. Opar, Leigh J. Weiss, et Bryan C. Heiderscheit. 2022. « Hamstring Strain Injury Rehabilitation ». *Journal of Athletic Training* 57(2): 125-35.
- Higashihara, Ayako et al. 2010. « Functional Differences in the Activity of the Hamstring Muscles with Increasing Running Speed ». *Journal of Sports Sciences* 28(10): 1085-92.

- Hioki, Maya et al. 2020a. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- . 2020b. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- Hogrel, Jean-Yves et al. 2015. « NMR Imaging Estimates of Muscle Volume and Intramuscular Fat Infiltration in the Thigh: Variations with Muscle, Gender, and Age ». *Age (Dordrecht, Netherlands)* 37(3): 9798.
- Islam, S. et al. 2022. « Fully Automated Deep-Learning Section-Based Muscle Segmentation from CT Images for Sarcopenia Assessment ». *Clinical Radiology* 77(5): e363-71.
- Iversen, Erik, Vibeke Røstad, et Arne Larmo. 2016. « Intermittent Blood Flow Restriction Does Not Reduce Atrophy Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Journal of Sport and Health Science* 5(1): 115-18.
- Jacobsen, Phil et al. 2016. « A Combination of Initial and Follow-up Physiotherapist Examination Predicts Physician-Determined Time to Return to Play after Hamstring Injury, with No Added Value of MRI ». *British Journal of Sports Medicine* 50(7): 431-39.
- Kemnitz, Jana et al. 2020. « Clinical Evaluation of Fully Automated Thigh Muscle and Adipose Tissue Segmentation Using a U-Net Deep Learning Architecture in Context of Osteoarthritic Knee Pain ». *Magma (New York, N.Y.)* 33(4): 483-93.
- Kenneally-Dabrowski, Claire J. B. et al. 2019. « Late Swing or Early Stance? A Narrative Review of Hamstring Injury Mechanisms during High-Speed Running ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 29(8): 1083-91.
- Kilroe, Sean P. et al. 2020a. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- . 2020b. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- Koulouris, George, et David Connell. 2003. « Evaluation of the Hamstring Muscle Complex Following Acute Injury ». *Skeletal Radiology* 32(10): 582-89.
- . 2005. « Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 25(3): 571-86.
- Koulouris, George, David A. Connell, Peter Brukner, et Michal Schneider-Kolsky. 2007. « Magnetic Resonance Imaging Parameters for Assessing Risk of Recurrent Hamstring Injuries in Elite Athletes ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(9): 1500-1506.
- Kulas, Anthony S. et al. 2018. « Bilateral Quadriceps and Hamstrings Muscle Volume Asymmetries in Healthy Individuals ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 36(3): 963-70.
- Kumazaki, T., Y. Ehara, et T. Sakai. 2012. « Anatomy and Physiology of Hamstring Injury ». *International Journal of Sports Medicine* 33(12): 950-54.

- Le Troter, Arnaud et al. 2016. « Volume Measurements of Individual Muscles in Human Quadriceps Femoris Using Atlas-Based Segmentation Approaches ». *Magma (New York, N.Y.)* 29(2): 245-57.
- Lemes, Italo Ribeiro et al. 2021. « Do Exercise-Based Prevention Programmes Reduce Non-Contact Musculoskeletal Injuries in Football (Soccer)? A Systematic Review and Meta-Analysis with 13 355 Athletes and More than 1 Million Exposure Hours ». *British Journal of Sports Medicine* 55(20): 1170-78.
- Linklater, James M. et al. 2010. « Hamstring Injuries: Anatomy, Imaging, and Intervention ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 14(2): 131-61.
- Lins, Carolina Freitas, Carlos Ernesto Garrido Salmon, et Marcello Henrique Nogueira-Barbosa. 2021. « Applications of the Dixon Technique in the Evaluation of the Musculoskeletal System ». *Radiologia Brasileira* 54(1): 33-42.
- Liu, Jia, Kristi L. Lewton, Patrick M. Colletti, et Christopher M. Powers. 2021. « Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(11): 2346-53.
- Louis, Luck J. 2008. « Musculoskeletal Ultrasound Intervention: Principles and Advances ». *Radiologic Clinics of North America* 46(3): 515-33, vi.
- Macdonald, Ben et al. 2019. « Hamstring Rehabilitation in Elite Track and Field Athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in Clinical Practice ». *British Journal of Sports Medicine* 53(23): 1464-73.
- Mack, Christina D. et al. 2020. « Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018 ». *The American Journal of Sports Medicine* 48(9): 2287-94.
- Mackey, Abigail L., et Michael Kjaer. 2017. « The Breaking and Making of Healthy Adult Human Skeletal Muscle in Vivo ». *Skeletal Muscle* 7(1): 24.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Gustaaf Reurink, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Injury Is Not Associated with an Increased Hamstring Reinjury Rate within 12 Months after Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 52(19): 1261-66.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Rod Whiteley, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Involvement on MRI Has Limited Value for Predicting Time to Return to Play Following Acute Hamstring Injury ». *British Journal of Sports Medicine* 52(2): 83-88.
- Mallinson, Joanne E. et al. 2020. « Longitudinal Hypertrophic and Transcriptional Responses to High-Load Eccentric-Concentric vs Concentric Training in Males ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 30(11): 2101-15.
- Mandić, Mirko et al. 2020. « Automated Assessment of Regional Muscle Volume and Hypertrophy Using MRI ». *Scientific Reports* 10(1): 2239.
- McCormick, Matthew et al. 2014. « ITK: Enabling Reproducible Research and Open Science ». *Frontiers in Neuroinformatics* 8: 13.
- Mendez-Villanueva, Alberto et al. 2016. « MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players ». *PLoS One* 11(9): e0161356.

- Mendiguchia, Jurdan et al. 2017. « A Multifactorial, Criteria-Based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 49(7): 1482-92.
- Mense, Siegfried. 2003. « The Pathogenesis of Muscle Pain ». *Current Pain and Headache Reports* 7(6): 419-25.
- Millan, M. J. 1999. « The Induction of Pain: An Integrative Review ». *Progress in Neurobiology* 57(1): 1-164.
- Moher, D., B. Pham, M. L. Lawson, et T. P. Klassen. 2003. « The Inclusion of Reports of Randomised Trials Published in Languages Other than English in Systematic Reviews ». *Health Technology Assessment (Winchester, England)* 7(41): 1-90.
- Monti, Elena et al. 2020. « The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training ». *Frontiers in Physiology* 11: 946.
- Morin, Jean-Benoît et al. 2015. « Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production ». *Frontiers in Physiology* 6: 404.
- Morse, Christopher I., Hans Degens, et David A. Jones. 2007. « The Validity of Estimating Quadriceps Volume from Single MRI Cross-Sections in Young Men ». *European Journal of Applied Physiology* 100(3): 267-74.
- Mühlenfeld, Nils et al. 2021. « Assessment of Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Football Players after Hamstring Injuries ». *European Journal of Sport Science*: 1-9.
- Nescolarde, L. et al. 2015. « Effects of Muscle Injury Severity on Localized Bioimpedance Measurements ». *Physiological Measurement* 36(1): 27-42.
- Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. 2019. « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI) ». *Journal de Traumatologie du Sport*.
- Nguyen, Hoai-Thu et al. 2021. « Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(4): 869-81.
- Nordez, Antoine et al. 2009. « Comparison of Methods to Assess Quadriceps Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 30(5): 1116-23.
- Nuell, Sergi et al. 2019a. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- . 2019b. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- Opar, David A. et al. 2015. « The Effect of Previous Hamstring Strain Injuries on the Change in Eccentric Hamstring Strength during Preseason Training in Elite Australian Footballers ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(2): 377-84.

- Orchard, J., et H. Seward. 2002. « Epidemiology of Injuries in the Australian Football League, Seasons 1997-2000 ». *British Journal of Sports Medicine* 36(1): 39-44.
- O'Sullivan, Lucy, Jamie Preszler, et Miho Tanaka. 2022. « Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 17(6): 1184-93.
- Panisset, Maya G. et al. 2020. « Factors Influencing Thigh Muscle Volume Change with Cycling Exercises in Acute Spinal Cord Injury - a Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial ». *The Journal of Spinal Cord Medicine*: 1-12.
- Patel, A. et al. 2015. « British Athletics Muscle Injury Classification: A Reliability Study for a New Grading System ». *Clinical Radiology* 70(12): 1414-20.
- Paton, Bruce M. et al. 2023. « London International Consensus and Delphi Study on Hamstring Injuries Part 1: Classification ». *British Journal of Sports Medicine*: bjsports-2021-105371.
- Peetrons, P. 2002a. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- . 2002b. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- Pieters, Dries, Evi Wezenbeek, Joke Schuermans, et Erik Witvrouw. 2021. « Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It Is Time to Consider Natural Healing ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(10): 2067-77.
- Pollock, Noel et al. 2016a. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2016b. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2021. « A 4-Year Study of Hamstring Injury Outcomes in Elite Track and Field Using the British Athletics Rehabilitation Approach ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Pollock, Noel, Steven L. J. James, Justin C. Lee, et Robin Chakraverty. 2014a. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- . 2014b. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- Pomeranz, S. J., et R. S. Heidt. 1993. « MR Imaging in the Prognostication of Hamstring Injury. Work in Progress ». *Radiology* 189(3): 897-900.
- Pons, Christelle et al. 2018. « Quantifying Skeletal Muscle Volume and Shape in Humans Using MRI: A Systematic Review of Validity and Reliability ». *PLoS One* 13(11): e0207847.
- Rees, Huw et al. 2021. « The Burden of Injury in Field Hockey: A Secondary Analysis of Prospective Cohort Data ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 31(4): 884-93.

- Rettig, Arthur C., Susan Meyer, et Arup K. Bhadra. 2013a. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- . 2013b. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- Reurink, G., R. Whiteley, et J. L. Tol. 2015. « Hamstring Injuries and Predicting Return to Play: “Bye-Bye MRI?” » *British Journal of Sports Medicine* 49(18): 1162-63.
- Reurink, Gustaaf et al. 2014. « MRI Observations at Return to Play of Clinically Recovered Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1370-76.
- Reurink, Gustaaf, Elisabeth G. Brilman, et al. 2015. « Magnetic Resonance Imaging in Acute Hamstring Injury: Can We Provide a Return to Play Prognosis? » *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45(1): 133-46.
- Reurink, Gustaaf, Emad Almusa, et al. 2015. « No Association between Fibrosis on Magnetic Resonance Imaging at Return to Play and Hamstring Reinjury Risk ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(5): 1228-34.
- Rubin, David A. 2012. « Imaging Diagnosis and Prognostication of Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 199(3): 525-33.
- Rush, Justin L., Grant E. Norte, et Adam S. Lepley. 2020. « Limb Differences in Hamstring Muscle Function and Morphology after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 45: 168-75.
- Safar Cherati, Afsaneh et al. 2016. « The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and Its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(3): e35289.
- Schache, Anthony G. et al. 2012. « Mechanics of the Human Hamstring Muscles during Sprinting ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(4): 647-58.
- Schneider-Kolsky, Michal E., Jan Lucas Hoving, Price Warren, et David A. Connell. 2006. « A Comparison between Clinical Assessment and Magnetic Resonance Imaging of Acute Hamstring Injuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(6): 1008-15.
- Sciascia, Aaron, Jacob Waldecker, et Cale Jacobs. 2020. « Pain Catastrophizing in College Athletes ». *Journal of Sport Rehabilitation* 29(2): 168-73.
- Shield, Anthony J., et Matthew N. Bourne. 2018. « Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 48(3): 513-24.
- Silder, Amy et al. 2013. « Clinical and Morphological Changes Following 2 Rehabilitation Programs for Acute Hamstring Strain Injuries: A Randomized Clinical Trial ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 43(5): 284-99.

- Slavotinek, John P., Geoffrey M. Verrall, et Gerald T. Fon. 2002. « Hamstring Injury in Athletes: Using MR Imaging Measurements to Compare Extent of Muscle Injury with Amount of Time Lost from Competition ». *AJR. American journal of roentgenology* 179(6): 1621-28.
- Söderman, K., H. Alfredson, T. Pietilä, et S. Werner. 2001. « Risk Factors for Leg Injuries in Female Soccer Players: A Prospective Investigation during One out-Door Season ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 9(5): 313-21.
- Souza, Jaqueline de, et Carmem Gottfried. 2013. « Muscle Injury: Review of Experimental Models ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 23(6): 1253-60.
- Speer, K. P., J. Lohnes, et W. E. Garrett. 1993. « Radiographic Imaging of Muscle Strain Injury ». *The American Journal of Sports Medicine* 21(1): 89-95; discussion 96.
- Sprague, Andrew L. et al. 2018. « Modifiable Risk Factors for Patellar Tendinopathy in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 52(24): 1575-85.
- Stępień, Karolina et al. 2019. « Anatomy of Proximal Attachment, Course, and Innervation of Hamstring Muscles: A Pictorial Essay ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 27(3): 673-84.
- Tate, Christine Marie, Glenn N. Williams, Peter J. Barrance, et Thomas S. Buchanan. 2006. « Lower Extremity Muscle Morphology in Young Athletes: An MRI-Based Analysis ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(1): 122-28.
- Timmins, Ryan G. et al. 2016. « Short Biceps Femoris Fascicles and Eccentric Knee Flexor Weakness Increase the Risk of Hamstring Injury in Elite Football (Soccer): A Prospective Cohort Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(24): 1524-35.
- Torğutalp, Şerife Şeyma et al. 2021. « Volume and T2 Relaxation Time Measurements of Quadriceps Femoris and Hamstring Muscles Are Reliable and Reproducible ». *Turkish Journal of Medical Sciences* 51(4): 2007-14.
- Trappe, T. A., D. M. Lindquist, et J. A. Carrithers. 2001a. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- . 2001b. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- Verrall, G. M. et al. 2001. « Clinical Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury: A Prospective Study with Correlation of Injury by Magnetic Resonance Imaging ». *British Journal of Sports Medicine* 35(6): 435-39; discussion 440.
- Verrall, G. M., Y. Kalairajah, J. P. Slavotinek, et A. J. Spriggins. 2006. « Assessment of Player Performance Following Return to Sport after Hamstring Muscle Strain Injury ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 9(1-2): 87-90.
- Verrall, Geoffrey M. et al. 2006. « Assessment of Physical Examination and Magnetic Resonance Imaging Findings of Hamstring Injury as Predictors for Recurrent Injury ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 36(4): 215-24.

- Verrall, Geoffrey M., John P. Slavotinek, Peter G. Barnes, et Gerald T. Fon. 2003. « Diagnostic and Prognostic Value of Clinical Findings in 83 Athletes with Posterior Thigh Injury: Comparison of Clinical Findings with Magnetic Resonance Imaging Documentation of Hamstring Muscle Strain ». *The American Journal of Sports Medicine* 31(6): 969-73.
- Vivodtzev, Isabelle et al. 2018. « Quadriceps Muscle Fat Infiltration Is Associated with Cardiometabolic Risk in COPD ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 38(5): 788-97.
- Walsh, Meghan et al. 2012. « Lower Extremity Muscle Activation and Knee Flexion during a Jump-Landing Task ». *Journal of Athletic Training* 47(4): 406-13.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2015. « MRI Does Not Add Value over and above Patient History and Clinical Examination in Predicting Time to Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Cohort of 180 Male Athletes ». *British Journal of Sports Medicine* 49(24): 1579-87.
- . 2016. « Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 44(8): 2112-21.
- Wangenstein, Arnlaug, Johannes L. Tol, et al. 2017. « Intra- and Interrater Reliability of Three Different MRI Grading and Classification Systems after Acute Hamstring Injuries ». *European Journal of Radiology* 89: 182-90.
- Wangenstein, Arnlaug, Roald Bahr, et al. 2017. « MRI Appearance Does Not Change in the First 7 Days after Acute Hamstring Injury—a Prospective Study ». *British Journal of Sports Medicine* 51(14): 1087-92.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2018. « New MRI Muscle Classification Systems and Associations with Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Study ». *European Radiology* 28(8): 3532-41.
- Weber, Kenneth A. et al. 2019. « Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury ». *Scientific Reports* 9(1): 7973.
- Williams, Sean, Grant Trewartha, Simon Kemp, et Keith Stokes. 2013. « A Meta-Analysis of Injuries in Senior Men's Professional Rugby Union ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 43(10): 1043-55.
- Williamson, Amelia, et Barbara Hoggart. 2005. « Pain: A Review of Three Commonly Used Pain Rating Scales ». *Journal of Clinical Nursing* 14(7): 798-804.
- Woods, C. et al. 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.
- Wu, Y. F. et al. 2021. « [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging] ». *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 53(5): 843-49.
- Yamauchi, Koun, Chisato Kato, et Takayuki Kato. 2019. « Characteristics of Individual Thigh Muscles Including Cross-Sectional Area and Adipose Tissue Content Measured by Magnetic

Resonance Imaging in Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study ». *Rheumatology International* 39(4): 679-87.

Yang, Zepa et al. 2023. « Deep Learning-Based Pectoralis Muscle Volume Segmentation Method from Chest Computed Tomography Image Using Sagittal Range Detection and Axial Slice-Based Segmentation ». *PloS One* 18(9): e0290950.

Table and Figures

Table

Table 1.

<i>Physical characteristics of the population</i>	<i>Mean (standard deviation)(Min-Max)</i>
<i>Age (years)</i>	27.5 (7.7) (18-47)
<i>Height (cm)</i>	181.6 (7.0) (171-206)
<i>Weight (kg)</i>	79.0 (10.5) (60-110)
<i>BMI (kg.m⁻²)</i>	24.0 (2.6) (19.6-31.7)
<i>Demographic characteristics of the population</i>	<i>Numbers (%)</i>
<i>Sports</i>	
<i>Soccer</i>	24 (39.3)
<i>Track and field</i>	20 (32.8)
<i>Trail</i>	5 (8.2)
<i>Basketball</i>	6 (9.8)
<i>Other</i>	6 (9.8)
<i>Sport level</i>	
<i>Professional</i>	17 (27.9)
<i>Semi-professional/national</i>	17 (27.9)
<i>Amateur</i>	27 (44.2)
<i>Medical history</i>	
<i>Previous hamstring muscle injury</i>	39 (63.9)
<i>Anterior cruciate ligament surgery</i>	7 (11.5)
<i>MRI characteristics of the lesions</i>	<i>Numbers (%)</i>
<i>Muscle injury</i>	
<i>No injury</i>	6 (14.6)
<i>One injury</i>	44 (72.1)
<i>More than one injury</i>	11 (18.0)
<i>Location</i>	
<i>Distal third</i>	22 (36.1)
<i>Middle third</i>	34 (55.7)
<i>Proximal third</i>	19 (31.1)
<i>Extensive (more than one third)</i>	14 (23.0)

<i>Muscle involved</i>	
<i>BFLH</i>	38 (62.3)
<i>BFSH</i>	3 (4.9)
<i>ST</i>	15 (24.6)
<i>SM</i>	17 (27.9)
<i>Peetrons' grade</i>	
<i>Grade 0</i>	6 (14.6)
<i>Grade 1</i>	14 (23.0)
<i>Grade 2</i>	37 (60.7)
<i>Grade 3</i>	4 (6.6)

Table 1. Patients and MRI characteristics

Figures

Figure 1.

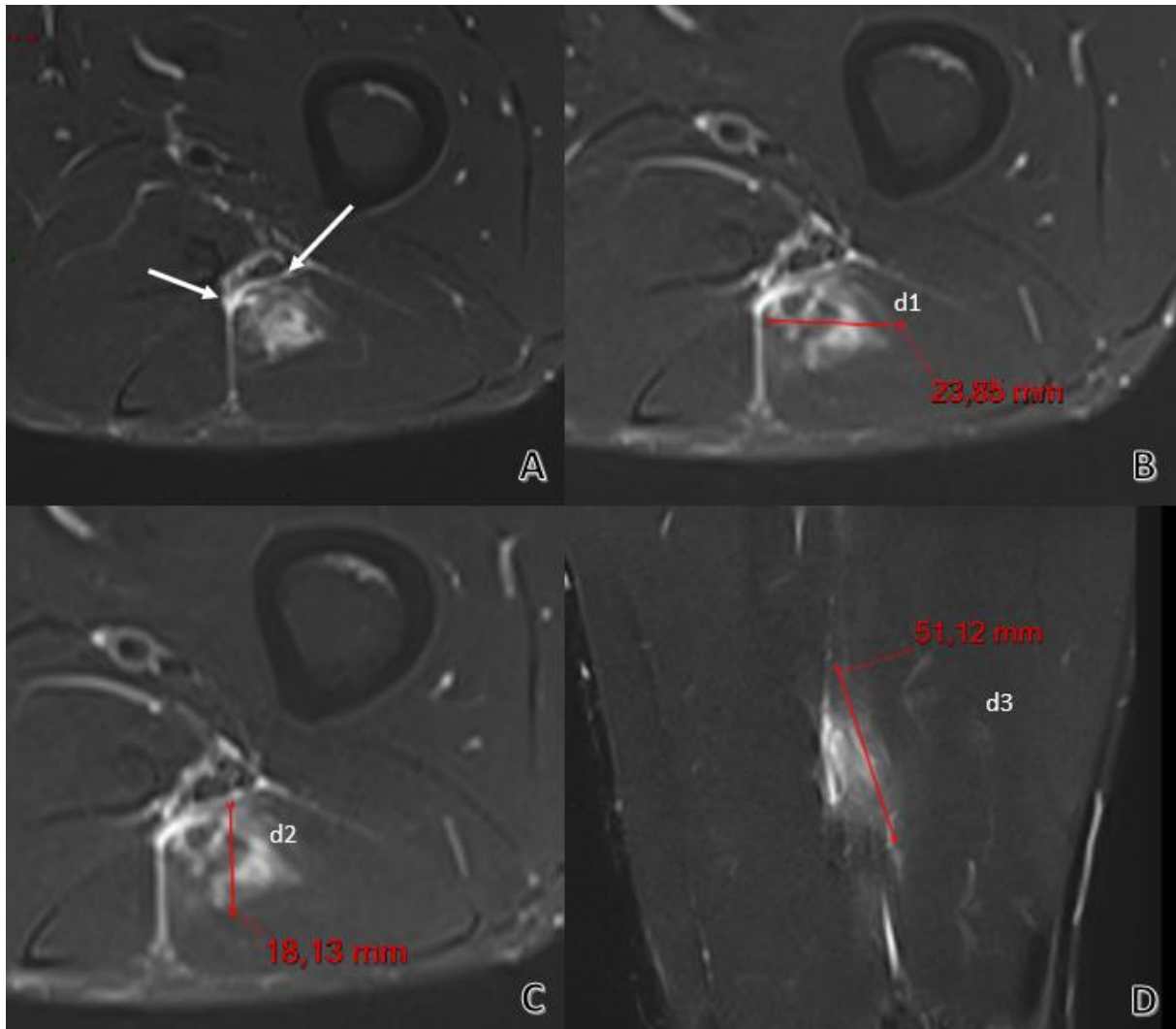


Figure 1. Examples of MR images centered on BFLH muscle tears, and measurements of the lesion. T2 Fat Sat MRI images in axial (A, B and C) and coronal (D) views centered on BFLH muscle tears. The first measurement (d1) corresponds to the greatest axial axis of the lesion, and the second in the axis perpendicular to the first (d2). The third measurement (d3), taken on the coronal section, corresponds to the maximum height according to the lesion. The measurement does not concern the effusion between the fascia (white arrow). From these three measurements, the lesion volume can easily be estimated.

Figure 2

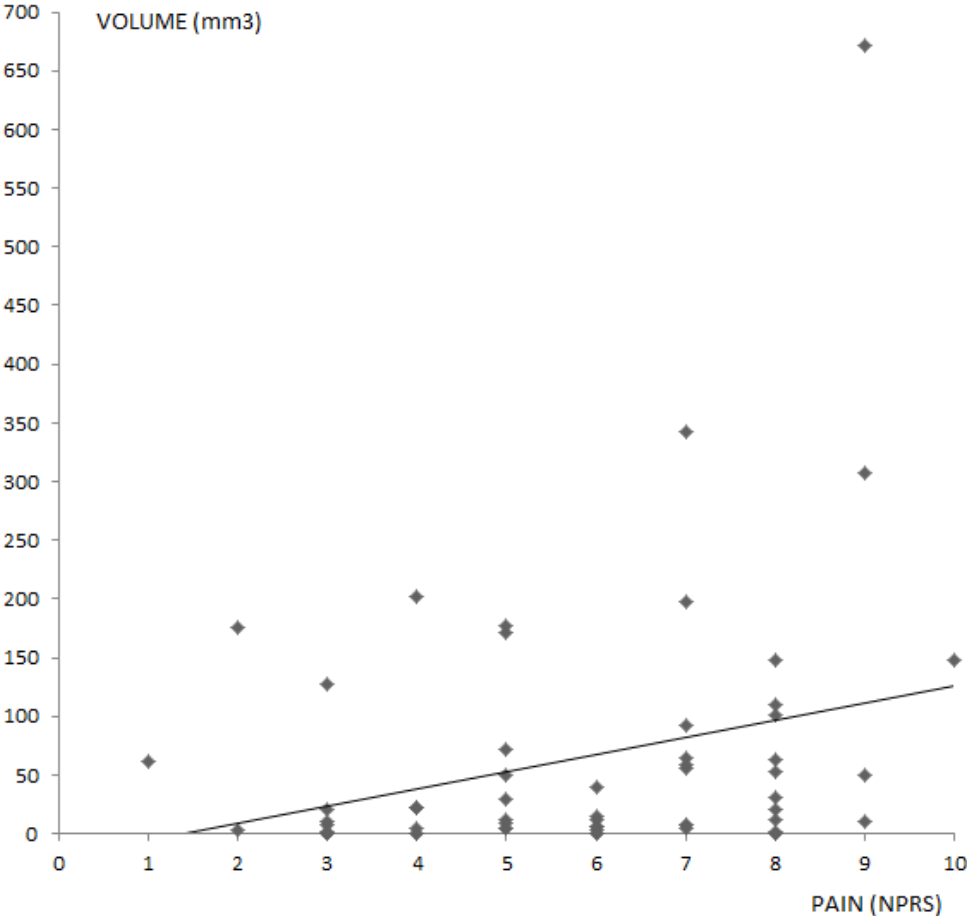


Figure 2: The correlation between the pain experienced at the time of a hamstring muscle injury measured by the Numeric Pain Rating Scale (NPRS) and the hyperintense T2-weight volume of the lesion measured on MRI.

Figure 3

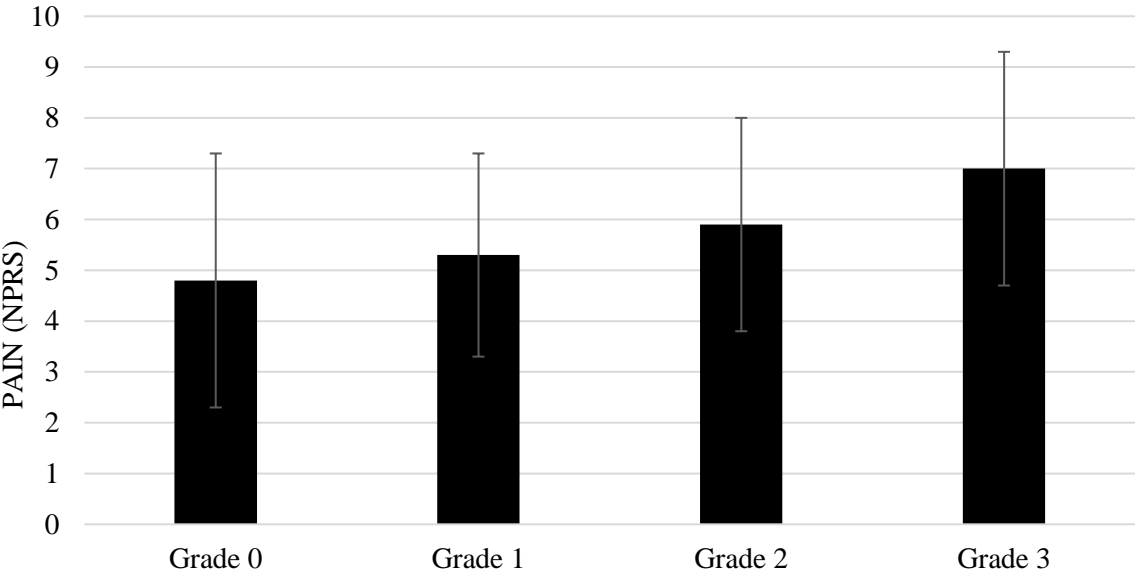


Figure 3: The Peetrans' grade according to the pain at the time of the hamstring injury measured using a Numeric Pain Rating Scale (NPRS) (mean \pm SD).

Figure 4

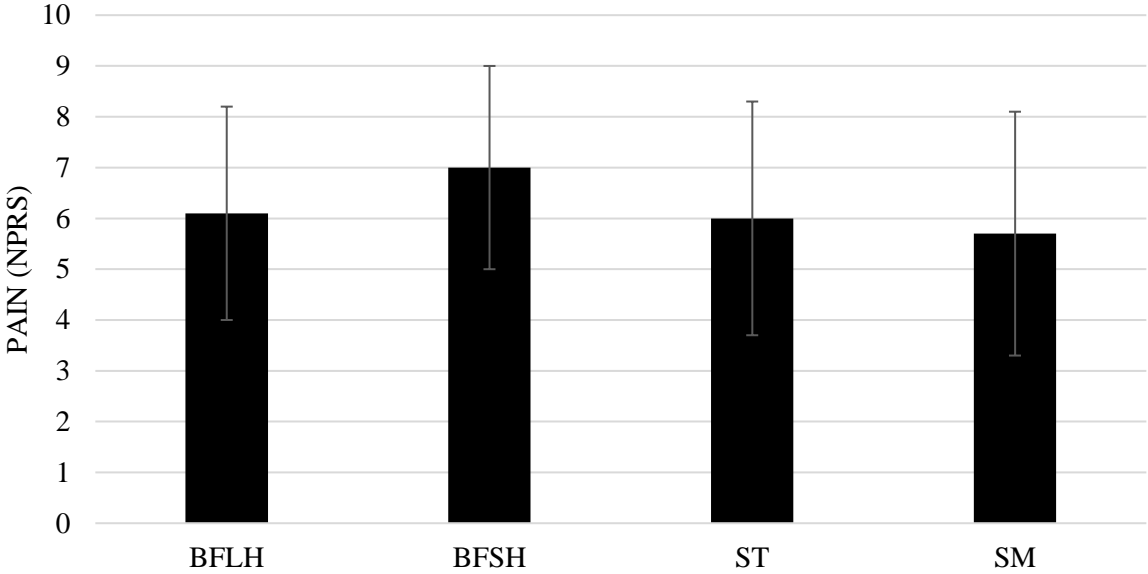


Figure 4: The hamstring muscle head involved according to the pain at the time of the hamstring injury measured using a Numeric Pain Rating Scale (NPRS) (mean ± SD)

BFLH (Biceps Femoris Long Head); BFSH (Biceps Femoris Short Head); Semi-Tendinosous (ST); Semi-Membranosous (SM)

Supplementary material

Supplementary 1

	1.5	3T
Matrix	336/448	291/448
Slice thickness (mm)	5	5
Relaxation time	3840	8500
Echo time	69	83
Pitch	0,5	0,5

Supplementary 1. MRI parameters: T2-weighted sequences with fat saturation.

3- Discussion

Les résultats de ce travail étaient notamment une corrélation entre un paramètre simple de l'examen clinique (la douleur au moment de la blessure) et un paramètre de l'IRM (le volume de la lésion musculaire à l'IRM). Ceci était cohérent avec une relation anatomo-clinique, cependant la douleur au moment de la blessure n'expliquait à elle seule que 8% (r^2) de la variance de l'étendue de l'œdème à l'IRM, et ne semblait donc pas suffisante pour nous donner une indication clinique significative du volume lésionnel à l'IRM. Cette information pourrait être utile en pratique clinique. En effet, si nous avons besoin de connaître l'étendue du volume de la lésion musculaire, une IRM semble nécessaire, et le seuil de la douleur au moment de la blessure ne semble pas être un indicateur suffisant.

Toutefois, certaines limites de notre étude doivent être reconnues. Nous pouvons considérer que notre échantillon de patients est relativement modeste. De plus, l'évaluation de la douleur a été réalisée de manière rétrospective, ce qui peut entraîner un biais de mémorisation, mais le court délai après l'IRM ($7,8 \pm 5,7$ jours, allant de 1 à 24) pourrait avoir limité ce biais. Par ailleurs, la douleur est une donnée subjective dont l'évaluation reste variable entre différents individus en fonction de nombreux facteurs (état émotionnel et psychologique, fatigue, culture...). De plus, notre étude n'évalue qu'un seul paramètre de l'examen clinique (la douleur).

En perspective, on pourrait imaginer que d'autres paramètres de l'examen clinique pourraient être explorés dans de futures études, comme par exemple la douleur pendant les manœuvres de mobilisation des ischio-jambiers, la flexibilité, la force... De plus, ces paramètres pour être analysés de manière combinée pour mieux optimiser la sélection des patients éligibles ou non à l'IRM.

E - Lien entre le mécanisme de la blessure et les données IRM

1- Objectifs

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe plusieurs types de mécanismes cliniques à l'origine d'une blessure des IJ : le sprint, l'étirement, le saut, et les autres (déplacement latéral, contact direct...). Etant donné qu'il existe aussi également différents types de lésions des IJ, nous avons émis l'hypothèse qu'il pourrait exister un lien entre les deux, et que des mécanismes cliniques spécifiques pourraient conduire à des lésions spécifiques. La mise en évidence de ce lien potentiel entre le mécanisme clinique et la localisation de la lésion pourrait permettre d'optimiser la rééducation après une blessure des IJ et aider à réduire le risque de récurrence. Dans ce contexte, notre objectif principal était d'analyser l'association entre le mécanisme de la blessure des IJ et le muscle lésé évalué par IRM. Les objectifs secondaires étaient de déterminer l'association possible entre le mécanisme clinique et : la localisation proximo-distale, le grade, et le volume de la lésion.

2- Article « HAMMER HAMMER »

“Relationship between patients’ self-reported injury mechanism and MRI outcomes in hamstring muscle injury: a prospective cohort study on 71 patients.”

Sylvain Grange, Gustaaf Reurink, Pierre Croisille, and Pascal Edouard.

Article soumis.

Abbreviations: HMI (Hamstring muscle injury); MRI (Magnetic Resonance Imaging); BF (Biceps Femoris); Semi-Tendinosus (ST); Semi-Membranosus (SM); Hamstring Muscle Injury (HMI); Numeric Pain Rating Scale (NPRS); Body Mass Index (BMI); Time to return to sport (TRTS); British Athletics Muscle Injury Classification (BAMIC); Anterior Cruciate Ligament (ACL).

Keywords: Hamstring muscle injury; injury mechanism; MRI; sports; epidemiology; risk factors.

Abstract:

Hamstring muscle injury (HMI) is the most common injury in sports requiring sprints and accelerations. Different HMI sub-types have been described according to muscle involved, location in the muscle, tissue involved, or injury severity. It could be of interest to determine whether these sub-types are related to a particular clinical injury mechanism. In this context, our primary objective was to analyze the association between the HMI mechanism and the muscle injured assessed with Magnetic Resonance Imaging (MRI). The secondary objectives were to determine the possible association between the HMI mechanism and 1) the injury proximo-distal position, 2) the MRI injury grade, or 3) the MR injury volume. We performed a prospective, multicenter, observational cohort study in patients with suspected hamstring injury. All underwent post-injury MRI and were assessed along with their mechanism of injury using a survey. Chi2 test and an ANOVA were used. A total of 71 patients were included in the present study. MRIs were performed within 7.5 ± 4.9 days after injury. There was no significant

association between the HMI mechanism and the injured muscle ($\chi^2=6.86$; $p=0.335$), nor with proximo-distal position ($\chi^2=20.28$; $p=0.161$). There was a significant association between HMI mechanism and HMI grade ($\chi^2=23.7$; $p=0.0006$) as well as with the HMI volume ($F(3,67)=5.223$; $p=0.003$) with significant higher severity and higher volume in stretching than in run mechanisms ($p=0.002$). We showed an association between the HMI mechanism and the MRI grade and volume, with significant higher injury grade and larger volume in stretching mechanism.

1. Introduction

Hamstring muscle injuries (HMI) are the most common injuries in sports requiring sprints and accelerations (Edouard et al. 2021b; Edouard, Branco, et Alonso 2016a; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016), potentially leading to substantial psychological, physical, social and economic consequences (Edouard, Branco, et Alonso 2016a; Ekstrand, Hägglund, et Waldén 2011; Fitzpatrick et al. 2018; Martin Hägglund et al. 2013; J. Hickey et al. 2014a). HMI thus represents a very important challenge in the sports and exercise medicine and science communities. To properly manage HMI, it is necessary to have a precise and detailed diagnosis (Macdonald et al. 2019). This means, at least, to determine the affected muscle (Biceps Femoris (BF), Semi-Tendinosus (ST), Semi-Membranosus (SM)), the injury position (proximal, central, distal, extensive) and/or the involved tissue (muscle, tendon, aponeurosis, myo-tendonous junction) (Grange et al. 2022). Yet often considered “unique”, HMI seems to be varied, depending on the muscle affected, its location, severity, extent, and the presence or not of a scar, a hematoma, or an interfascial effusion.

In parallel, there is also a great variety of the injury mechanisms leading to HMI: HMI can occur during a run, a jump, a stretch or another mechanism (lateral displacement, direct contact...) (Gronwald et al. 2022; Kenneally-Dabrowski et al. 2019). These different injury mechanisms can be identified by questioning the patient. Given that there are different types of mechanisms and also different types of lesions, we hypothesized that there could exist a link between both, and that specific clinical mechanisms could lead to specific lesions. The demonstration of this potential link could guide HMI rehabilitation and also be of help in the development of HMI risk reduction strategies (Paton et al. 2023). If a given injury mechanism can be associated with a certain type of injury, we can early orient the patient to the best type of rehabilitation from the outset. For example, it has already been described that the clinical injury mechanism (stretching) in dancers was associated with a lesion of the proximal SM, tendon structure and high grade of lesion (grade 3) (Askling et al. 2007b, 2008). Thus, when a dancer present stretching injury mechanism it is suggested to apply the management appropriate to proximal grade 3 SM lesion before full confirmation (Askling et al. 2008). If we confirm this close link between the clinical mechanism and HMI, we could, as soon as the clinical mechanism is described by the patient, orient towards the best management.

When it comes to investigating these lesions, it is important to understand that the presence of a muscular injury is confirmed by at least observing swelling in the muscle tissue. This can be assessed objectively by imaging approaches using either ultrasound or Magnetic Resonance Imaging (MRI) (Crema et al. 2015). Both imaging techniques have their strengths and weaknesses (Connell et al. 2004). MRI has a better contrast than ultrasound making it more sensitive to deep muscle and tendon injuries (Connell et al. 2004). It is also considered the “gold standard” for hamstring injuries (Crema et al. 2015). Furthermore, MRI can also reliably assess the lesion grades of the injury (Wangenstein, Tol, et al. 2017). MRI is also the method of choice for research investigations due to its higher reproducibility, its low operator-dependence, that facilitates a systemic 2D or 3D sampling of the region of interest, that ultimately improve reading performance (Crema et al. 2015; Wangenstein, Tol, et al. 2017). Hence, for all those reasons and because MRI was accessible in our environment, we made the decision to use MRI as the primary imaging technique in our study. MRI allows also to estimate the grade of the lesion, especially the Peetron’s classification (25) (a fairly simple classification used in current practice in our hospital), which is widely used in current clinical practice (Patel et al. 2015; Peetrons 2002b; Wangenstein et al. 2018; Wangenstein, Tol, et al. 2017). The severity of the muscular lesion is thus graded according to whether it is only oedematous (grade 1), or whether there is damage to the musculoaponeurotic architecture (grade 2), or even a complete rupture (grade 3) of the latter (25). Lesion grade can also be also reported according to the British Athleatics Muscle Injury Classification (BAMIC), this classification seems to be progressively imposed as being the most often used (18). This classification is more detailed and takes into account the severity of the lesion, classified from 0 (negative MRI) to 4 (complete rupture). It also details the myofascial (A), musculotendinous (B), or intratendinous (C) involvement (18).

In this context, our primary objective was to examine the potential connection between HMI mechanisms and muscle injuries observed in Magnetic Resonance Imaging (MRI). The secondary objectives were to determine the possible association between the HMI mechanism and 1) the injury proximo-distal position, 2) the MRI injury grade, and 3) the MR injury volume.

2. Methods

2.1. Study design and experimental protocol

We performed a prospective, multicenter, noninterventional cohort study entitled HAMMER study (acronym for HAMstring MEchanics and mRi). The HAMMER study consisted in performing a thigh MRI in patients with a clinical suspicion of a hamstring muscle injury. Additionally, the patients required to fill out a self-questionnaire at the time of the MRI, providing details about the circumstances and mechanism of the injury. The HAMMER study received approval from the Comité de Protection des Personnes d'Île-de-France V (CPP IDF 5: 17059; N° ID-RBC; 2017-A03433-50).

2.2. Population

The patients were recruited in two MR imaging centers: the university hospital of Saint-Etienne and the mutualist clinic of Saint-Etienne. The patients were referred by their attending physician or by sports physician for MRI of the thigh following the suspicion of a hamstring muscle injury occurring during sports practice. The inclusion criteria were: recreational/amateur, high-level or professional male athletes, aged 18 to 50 years, referred by their attending physician or their sports physician to a medical imaging facility for an MRI of the thigh in the context of a suspected acute hamstring muscle injury occurring during sports practice, completion of the MRI within 21 days of the injury. Exclusion criteria were female gender (taking into account the musculo-tendinous variations between the two sexes (Behan et al. 2018)), inability to understand the French language, patients with a history of anterior cruciate ligament (ACL) (taking into account the deficits in hamstring function after ACL reconstruction (Buckthorpe et al. 2021)) surgery with homolateral hamstring harvesting.

2.3. Data collection

MRIs were performed on 1.5 T (Aera, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany)) or 3T (Prisma 3T, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) units. The axial and coronal sequences were performed in T1 and T2 weighting with fat saturation. MRI parameters are detailed in supplementary data 1. The musculotendinous insertion proximal to the ischial tuberosity, the insertions distal to the head of the fibula, and the proximal end of the tibia should be included in the field of view. The data were analysed by a radiologist specialized in musculoskeletal

imaging (SG). The hamstring muscle head involved in the injury was noted, and the “primary lesion” was defined as the muscle lesion with the largest volume of injury. Lesion grade was reported according to the Peetrons (25) and BAMIC (18) classifications. Lesion boundaries were defined as any hyperintensity change at fluid sensitive sequences of musculo-aponeurotic and tendon structures. Signal changes between fascia were not considered as part of the lesion (i.e. the effusion between the fascia). The lesion was measured on the basis of its three dimensions (anteroposterior, craniocaudal, and mediolateral diameter). The volume of the affected muscle was approximated by the volume of an ellipsoid. For more information on how to calculate the volume, see the following reference (Geirsson, Christie, et Patel 1982b).

At the end of the imaging examination, a self-reported questionnaire was given to the patient with questions about their physical characteristics (height, weight, BMI (Body Mass Index), age, job), their current sports practice (type of sport, level of practice), their personal history of injury, the circumstances of the injury (training, return to training, competition). It was also reported the HMI mechanism at the time of injury, differentiating between running, jumping, stretching, or other mechanism (lateral movement, strike, a change of direction, a tackle, or a direct contact). The lesion mechanisms were then classified according to “run”, “stretching”, “jump” or “other”.

In the present study, we used the following MRI outcomes: muscle(s) involved, proximo-distal position, grade and volume of injury; as well as clinical mechanism of the injury collected in the self-reported questionnaire.

2.4. Statistical analysis

Descriptive analysis was performed with number and percentage for the categorical variables, and mean and standard deviation (SD) as well as a minimum and maximum, for the continuous variables. In order to analyze the potential association between HMI mechanisms (run, jump, stretching, other) and the MRI HMI outcomes (muscle head concerned, muscle position, grade), we used the Chi2 test for categorical variables and an ANOVA with Tukey post hoc tests for volume for continuous variables; normality of the distribution was checked before the tests. Statistical analyses were performed using Excel software (Office, Microsoft®,

Redmond, USA) and JASP statistical software package (Version 0.16.4 (JASP team, jasp-stats.org). The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

3. Results

Population

From February 1, 2018 to October 11, 2022, 77 patients were referred for an MRI of the hamstring muscles at the two radiology centers in Saint-Etienne and were assessed for eligibility. Six were women and were therefore excluded. Thus, a total of 71 patients were included in the present study. The physical and demographic characteristics of the included patients are presented in Table 1. The main sports practiced by patients were soccer (36.6%) and Track and Field (36.6%), at an amateur level (42.3%). More than half of the patients already had a previous history of HMI (57.7%).

Hamstring muscle injuries outcomes

The main MRI characteristics of the HMI are presented in Table 1. The average delay between the day of HMI and MRI was 7.5 ± 4.9 (range from 1 to 21) days. The majority of patients had a single lesion (73.2%). Most of the primary lesions affected the BF (66.2%). There were more injuries in the middle third (33.8%) of the muscle. The most frequent severity was grade 2 according to the Peetrons classification (66.7%). Most of lesions were classified as 2B (31.0%) or 3B (33.8%) according to the BAMIC classification. The mean lesion volume was 71.6 ± 105.1 mL.

3.3 Analysis of HMI mechanism and HMI MRI outcomes

The clinical mechanisms most often involved was running (66.2%), followed by jumping (12.7%), stretching (11.3%) and others (9.9%). There was no significant association between the HMI mechanism and HMI muscle evaluated by MRI ($\chi^2 = 6.86$; $p = 0.335$), nor between the HMI mechanism and HMI position evaluated by MRI ($\chi^2 = 20.28$; $p = 0.161$) (Table 1 and Figure 2). There was a significant association between HMI mechanism and HMI grade evaluated by MRI ($\chi^2 = 23.7$; $p = 0.0006$) (Table 1 and Figure 2), with significant higher grade in stretching

mechanism, as well as with the HMI volume evaluated by MRI ($F(3,67)=5.223$; $p=0.003$) with significant higher volume in stretching than in running mechanism ($p=0.002$) (Table 1 and Figure 3). The supplementary data 2 shows the analysis of MRI grade and localization of hamstring muscle injuries.

4. Discussion

The main findings of the present study were that 1) there was no significant association between HMI mechanism and muscle affected, and with the muscle position, and 2) there was a significant association between HMI mechanism and HMI grade and with HMI volume evaluated by MRI, with higher grade (important part of grade 3) and larger volume with stretching mechanisms.

This study has the strength to present a clear and detailed description of hamstring injuries in a population of athletes with muscle, location, severity (grade and volume) and clinical injury mechanism (Tables 2 and 3). By exploring the HMI in these different dimensions, our results clearly highlight the diversity of the HMI. A recent video analysis study (Gronwald et al. 2022) clearly shows that there are two types of HMI in soccer. Thus, sprint-related hamstring injuries occur during linear acceleration or high-speed running, and stretch-related hamstring injuries are related to closed-chain movements such as braking or stopping with a swinging or braking action, and open-chain movements such as kicking. A "hamstring injury" should be considered to have several subtypes of injuries, depending on the muscle affected, the position, the severity and the clinical mechanism (Grange et al. 2022). Given the different types of HMI, the management of each of these different injuries must be researched and optimized, particularly in terms of time to return to sport and type of rehabilitation. Indeed, it should be relevant to consider the HMI described separately (17), and no longer considered as a single injury. We also suggest that a more precise description of HMI would be relevant. Thus, when a diagnosis of HMI is made, and when it is possible, a more precise lesion diagnosis should be performed. This could be useful for the therapeutic management. Thus, some authors have established precise rehabilitation protocols according to the lesions (Macdonald et al. 2019). This would make it possible to adopt the most appropriate management for a given type of

injury, in terms of exercises programme and time to return to sport, and to set up the most personalized rehabilitation possible (Crema et al. 2016; Hegyi et al. 2018; Kenneally-Dabrowski et al. 2019). This could also have an impact on the prognosis for the risk of recurrence. For example, a stretch injury would be more severe (grade and volume), and therefore would require a longer time to return to sport.

In the present study, we hypothesized a link between the muscle and the mechanism. Indeed, the different heads of the hamstring muscles do not have the same functions, and that according to the mechanism, it could have been a different muscle affected. Our results do not confirm this hypothesis. Explanation could be i) a lack of statistical power (too modest number of included patients compared to the number of different groups), or ii) there is indeed no mechanical link. However, some studies reported a link between the lesion mechanism and the type of muscle affected, and in particular between the semimembranosus and the stretching mechanism (Askling et al. 2007b, 2008). This supports the need to perform comparable studies.

Our results established a link between the clinical mechanism and the HMI grade and volume, as the grade and the volume were larger when caused by a stretching than by a contraction. The main difference seems to be the important part of grade 3 in the stretching mechanism, which is not the case in the other types of mechanism. This is in agreement with the literature (Askling et al. 2007b, 2008). In fact, there are two main types of injury that seem to emerge depending on the clinical mechanism, namely during sprinting or stretching (Askling et al. 2007b, 2007a, 2008; Gronwald et al. 2022). A recent systematic review (Danielsson et al. 2020) confirmed that an HMI is caused by significant hip flexion with a stretched knee in extension; whereas hamstring injuries during sprinting are more likely to occur with excessive muscle tension caused by eccentric contraction during the late swing phase. During a stretch, the tendinous and aponeurotic structures would be more subjected to stress forces and therefore more easily injured. Hamstring injuries that extend into the tendon are more prone to re-injury and delay time to return to full training (Pollock et al. 2016b).

As strengths of this present study, we can report that the characteristic of patients and HMI included in this study appear to be consistent with those reported in the scientific literature

(Grange et al. 2022), notably the predominance of isolated damage to a single muscle, predominance of BFLH and grade 2 lesion according to the Peetrans classification. Furthermore, this study shows that the most frequent involvement was the mid- muscle, and the presence of extensive injuries were rare (less than one in 10 cases). It has been shown that the description of hamstring injuries was incomplete in the literature (Grange et al. 2022). The HMI were not accurately characterized: the precise tissue location (muscular, muscular-tendinous, etc.), the position of the injury (proximal, central, distal), the volume (Grange et al. 2022). In our study, we tried to be as descriptive as possible. Discrepancies in the literature may be partly related to a lack of exploration of the available MRI parameters and the lack of standardization.

Some limitations of our present study have to be acknowledged. We can consider our patient sample as small compared to some cohorts in the literature (Ekstrand, Lee, et Healy 2016; Martin Häggglund et al. 2013), which could be one reason for the non-significant association between some clinical parameters and MRI outcomes. In addition, there could have been a memory bias when patients completed the questionnaire. However, the MRIs were performed within a short period of time after the injury. In addition, the injury event was often quite significant for the patients and they remember very well the moment of the injury and therefore the injury mechanism.

The present work highlights some potential perspectives. It seems interesting to continue the investigations on other clinical parameters, in order to be able to discuss at best the interest or not of carrying out a complementary MRI from the various clinical parameters. This is indeed a big unresolved question: when to perform a complementary examination in case of an HMI? In view of this work, it can therefore be said that the fact that a lesion occurs as a result of a stretching mechanism is an additional argument for paying particular attention and having an imaging examination discussed. There appears to be a need to improve the MRI description of hamstring injuries (Macdonald et al. 2019; Pollock et al. 2016b, 2021; Wangenstein et al. 2018). Thus, it has been shown that there is a great heterogeneity in the literature (Grange et al. 2022). Regarding grade classification, the BAMIC one seems to be gradually becoming the reference (Macdonald et al. 2019; Pollock et al. 2021; Wangenstein et al. 2018). It is more precise than that of Peetrans. However, it remains quite simple to use.

In addition, the precise location, i.e. the combination of a tissue location and a given muscle (e.g. the myotendinous junction, proximal to the BF) will have to be assessed individually. However, this will require very large cohorts of patients. Other parameters such as clinical ones also need to be better evaluated (for example pain at the time of injury) and should be explored in future studies. It seems essential to be able to clarify the link between the symptomatology of the injury, based on questioning and clinical examination, and the need to perform an MRI or not. One could imagine a decision algorithm to decide both the need for imaging or not, in which the presence of a stretch injury mechanism would be a strong argument for performing an MRI. It seems that an HMI with a stretching mechanism should particularly alert the clinician.

Our results could have practical clinical applications. Indeed, it could help clinicians to identify patients for whom a longer time to return to sport is expected than for others. Determining the clinical mechanism could be an easy task through asking the athlete, and often quite well described by them. Thus, in the case of a stretching mechanism, it is probably a more severe injury, and therefore requires detailed questioning and clinical examination to rule out a complete rupture, and depending on this, discuss additional imaging. Indeed, in case of entheses avulsion, this may completely change the management. It could immediately determine the need for surgical advice. In addition, certain exercises seem to be more appropriate in certain clinical circumstances. A recent meta-analysis showed that a targeted, demand-specific approach to exercise-based injury reduction programs could reduce the risk of non-contact hamstring injuries by 35% (Lemes et al. 2021). For example, the preventive effect of Nordic hamstring exercises on the hamstrings may be attributed to their ability to increase muscle fascicles length, as short hamstring fascicles are associated with an increased risk of hamstring injury (Timmins et al. 2016). In addition, the different hamstring rehabilitation exercises have shown to have a different activity on each muscle (Mendez-Villanueva et al. 2016). Individual and multi-component programs can be useful to stimulate the hamstring muscle complex (Shield et Bourne 2018).

5. Perspective

Our results are in favour of an anatomical-clinical relationship between a simple clinical interrogation parameter (mechanisms of injury) and the severity of the lesion (grade and volume): stretching injury mechanisms is more prone to lesions of higher grade and larger volume. It seems that a hamstring injury with a stretching mechanism should particularly alert the clinician, as this would impose a longer delay to return to sport than for others. In addition, this will allow better selection of patients for MRI or not, based on a simple question asked during the patient's interrogation. Moreover, there seems to be a need to improve the MRI description of hamstring injuries. In addition, other parameters, particularly clinical ones, should be explored in future studies, in comparison with MRI parameters.

References

- Agosti, Abramo et al. 2021. « Deep Learning for Automatic Segmentation of Thigh and Leg Muscles ». *Magma (New York, N.Y.)*.
- Albu, Alexandra Branzan, Trevor Beugeling, et Denis Laurendeau. 2008. « A Morphology-Based Approach for Interslice Interpolation of Anatomical Slices from Volumetric Images ». *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55(8): 2022-38.
- Asakawa, Deanna S., Silvia S. Blemker, Garry E. Gold, et Scott L. Delp. 2002. « In Vivo Motion of the Rectus Femoris Muscle after Tendon Transfer Surgery ». *Journal of Biomechanics* 35(8): 1029-37.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Tõnu Saartok, et Alf Thorstensson. 2007a. « Acute First-Time Hamstring Strains during High-Speed Running: A Longitudinal Study Including Clinical and Magnetic Resonance Imaging Findings ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(2): 197-206.
- . 2007b. « Acute First-Time Hamstring Strains during Slow-Speed Stretching: Clinical, Magnetic Resonance Imaging, and Recovery Characteristics ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(10): 1716-24.
- . 2008. « Proximal Hamstring Strains of Stretching Type in Different Sports: Injury Situations, Clinical and Magnetic Resonance Imaging Characteristics, and Return to Sport ». *The American Journal of Sports Medicine* 36(9): 1799-1804.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Olga Tarassova, et Alf Thorstensson. 2014. « Acute Hamstring Injuries in Swedish Elite Sprinters and Jumpers: A Prospective Randomised Controlled Clinical Trial Comparing Two Rehabilitation Protocols ». *British Journal of Sports Medicine* 48(7): 532-39.

- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, et Alf Thorstensson. 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): 953-59.
- Balius, Ramon et al. 2019. « Sonographic Landmarks in Hamstring Muscles ». *Skeletal Radiology* 48(11): 1675-83.
- Barnouin, Yoann et al. 2014. « Manual Segmentation of Individual Muscles of the Quadriceps Femoris Using MRI: A Reappraisal ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 40(1): 239-47.
- Baron, Jacqueline E., Emily A. Parker, Kyle R. Duchman, et Robert W. Westermann. 2020. « Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8(6): 2325967120930296.
- Baumgart, Christian et al. 2021. « Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(16): 8727.
- Becciolini, Marco, Giovanni Bonacchi, et Stefano Bianchi. 2019. « Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine* 38(5): 1367-82.
- Behan, Fearghal P., Thomas M. Maden-Wilkinson, Matt T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2018. « Sex Differences in Muscle Morphology of the Knee Flexors and Knee Extensors ». *PLoS One* 13(1): e0190903.
- van Beijsterveldt, A. M. C., I. G. L. van de Port, A. J. Vereijken, et F. J. G. Backx. 2013. « Risk Factors for Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Systematic Review of Prospective Studies ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23(3): 253-62.
- Beltran, Luis, Varand Ghazikhanian, Mario Padron, et Javier Beltran. 2012a. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- . 2012b. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- Besson, J. M. 1997. « [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain] ». *Drugs* 53 Suppl 2: 1-9.
- Birchmeier, Thomas et al. 2020. « Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 38(3): 598-608.
- Bland, J. M., et D. G. Altman. 1986. « Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement ». *Lancet (London, England)* 1(8476): 307-10.
- Bourne, M. N. et al. 2016. « Muscle Activation Patterns in the Nordic Hamstring Exercise: Impact of Prior Strain Injury ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(6): 666-74.

- Brandser, E. A. et al. 1995. « Hamstring Injuries: Radiographic, Conventional Tomographic, CT, and MR Imaging Characteristics ». *Radiology* 197(1): 257-62.
- Brooks, J. H. M., C. W. Fuller, S. P. T. Kemp, et D. B. Reddin. 2005. « A Prospective Study of Injuries and Training amongst the England 2003 Rugby World Cup Squad ». *British Journal of Sports Medicine* 39(5): 288-93.
- Brooks, John H. M., Colin W. Fuller, Simon P. T. Kemp, et Dave B. Reddin. 2006. « Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(8): 1297-1306.
- Buckthorpe, Matthew et al. 2021. « Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(4): 607-24.
- Campbell, Scot E., Ronald Adler, et Carolyn M. Sofka. 2005. « Ultrasound of Muscle Abnormalities ». *Ultrasound Quarterly* 21(2): 87-94; quiz 150, 153-54.
- Chan, Otto, Angelo Del Buono, Thomas M. Best, et Nicola Maffulli. 2012. « Acute Muscle Strain Injuries: A Proposed New Classification System ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 20(11): 2356-62.
- Chang, Justin S. et al. 2020. « Management of Hamstring Injuries: Current Concepts Review ». *The Bone & Joint Journal* 102-B(10): 1281-88.
- Cohen, Steven B. et al. 2011. « Hamstring Injuries in Professional Football Players: Magnetic Resonance Imaging Correlation with Return to Play ». *Sports Health* 3(5): 423-30.
- Connell, David A. et al. 2004. « Longitudinal Study Comparing Sonographic and MRI Assessments of Acute and Healing Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 183(4): 975-84.
- Constantin-Teodosiu, Dumitru, et Despina Constantin. 2021. « Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *International Journal of Molecular Sciences* 22(21): 11587.
- Crema, Michel D. et al. 2015. « Imaging Techniques for Muscle Injury in Sports Medicine and Clinical Relevance ». *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 8(2): 154-61.
- . 2016. « Acute Hamstring Injury in Football Players: Association between Anatomical Location and Extent of Injury-A Large Single-Center MRI Report ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19(4): 317-22.
- Crema, Michel D., Ivan R. B. Godoy, et al. 2018. « Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play ». *Sports Health* 10(1): 75-79.
- Crema, Michel D., Mohamed Jarraya, et al. 2018a. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- . 2018b. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.

- Dalton, Sara L., Zachary Y. Kerr, et Thomas P. Dompier. 2015. « Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(11): 2671-79.
- Danielsson, Adam et al. 2020. « The Mechanism of Hamstring Injuries - a Systematic Review ». *BMC musculoskeletal disorders* 21(1): 641.
- De Smet, A. A., et T. M. Best. 2000. « MR Imaging of the Distribution and Location of Acute Hamstring Injuries in Athletes ». *AJR. American journal of roentgenology* 174(2): 393-99.
- De Smet, AA, et TM Best. 2000. « MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes ». *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY* 174(2): 393-99.
- De Vos, Robert-Jan et al. 2014. « Clinical Findings Just after Return to Play Predict Hamstring Re-Injury, but Baseline MRI Findings Do Not ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1377-84.
- Delvaux, François et al. 2014. « Return-to-Play Criteria after Hamstring Injury: Actual Medicine Practice in Professional Soccer Teams ». *Journal of Sports Science & Medicine* 13(3): 721-23.
- Dictionnaire Larousse.*
- Diemer, Willemijn M. et al. 2021. « Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million Sport Exposure Hours ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 51(1): 27-36.
- Dorn, Tim W., Anthony G. Schache, et Marcus G. Pandy. 2012. « Muscular Strategy Shift in Human Running: Dependence of Running Speed on Hip and Ankle Muscle Performance ». *The Journal of Experimental Biology* 215(Pt 11): 1944-56.
- Dunlop, Gordon et al. 2020. « Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 50(4): 829-40.
- Edouard, Pascal et al. 2021a. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport*.
- . 2021b. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 24(7): 653-59.
- Edouard, Pascal, Pedro Branco, et Juan-Manuel Alonso. 2016a. « 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): 619-30.
- . 2016b. « 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): 619-30.
- Ekstrand, Jan et al. 2012. « Hamstring Muscle Injuries in Professional Football: The Correlation of MRI Findings with Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 46(2): 112-17.

- . 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): 292-98.
- Ekstrand, Jan, Martin Hägglund, et Markus Waldén. 2011. « Epidemiology of Muscle Injuries in Professional Football (Soccer) ». *The American Journal of Sports Medicine* 39(6): 1226-32.
- Ekstrand, Jan, Justin C. Lee, et Jeremiah C. Healy. 2016. « MRI Findings and Return to Play in Football: A Prospective Analysis of 255 Hamstring Injuries in the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 738-43.
- Ekstrand, Jan, Armin Spreco, Håkan Bengtsson, et Roald Bahr. 2021a. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- . 2021b. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Ekstrand, Jan, Markus Waldén, et Martin Hägglund. 2016. « Hamstring Injuries Have Increased by 4% Annually in Men's Professional Football, since 2001: A 13-Year Longitudinal Analysis of the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 731-37.
- Evangelidis, Pavlos E., Garry J. Massey, Matthew T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2016. « Strength and Size Relationships of the Quadriceps and Hamstrings with Special Reference to Reciprocal Muscle Balance ». *European Journal of Applied Physiology* 116(3): 593-600.
- Farrow, M. et al. 2021. « Quantitative MRI in Myositis Patients: Comparison with Healthy Volunteers and Radiological Visual Assessment ». *Clinical Radiology* 76(1): 81.e1-81.e10.
- Fedorov, Andriy et al. 2012. « 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network ». *Magnetic Resonance Imaging* 30(9): 1323-41.
- Fitzpatrick, Anna C., Adam S. Naylor, Peter Myler, et Colin Robertson. 2018. « A Three-Year Epidemiological Prospective Cohort Study of Rugby League Match Injuries from the European Super League ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21(2): 160-65.
- Fletcher, Amanda N., Jonathan W. Cheah, Shane J. Nho, et Richard C. Mather. 2021. « Proximal Hamstring Injuries ». *Clinics in Sports Medicine* 40(2): 339-61.
- Flores, Dyan V. et al. 2018. « MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 38(1): 124-48.
- Franchi, M. V. et al. 2014a. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- . 2014b. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- Francis, Peter et al. 2017. « Measurement of Muscle Health in Aging ». *Biogerontology* 18(6): 901-11.

- Freckleton, Grant, et Tania Pizzari. 2013. « Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 47(6): 351-58.
- Fried, T., et G. J. Lloyd. 1992. « An Overview of Common Soccer Injuries. Management and Prevention ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 14(4): 269-75.
- Frouin, Antoine et al. 2023. « Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes ». *Ultrasound in Medicine & Biology*: S0301-5629(23)00064-9.
- Fukunaga, T. et al. 2001. « Muscle Volume Is a Major Determinant of Joint Torque in Humans ». *Acta Physiologica Scandinavica* 172(4): 249-55.
- Gabbe, B. J. et al. 2006. « Predictors of Hamstring Injury at the Elite Level of Australian Football ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 16(1): 7-13.
- Geirsson, R. T., A. D. Christie, et N. Patel. 1982a. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- . 1982b. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- Gibbs, N. J., T. M. Cross, M. Cameron, et M. T. Houang. 2004. « The Accuracy of MRI in Predicting Recovery and Recurrence of Acute Grade One Hamstring Muscle Strains within the Same Season in Australian Rules Football Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 7(2): 248-58.
- Gibby, Wendell A. 2005. « Basic Principles of Magnetic Resonance Imaging ». *Neurosurgery Clinics of North America* 16(1): 1-64.
- Gouttebauge, Vincent, Brendan A. Hughes Schwab, Adam Vivian, et Gino M M J Kerkhoffs. 2016. « Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(1): e31385.
- Grange, Sylvain et al. 2022. « Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review ». *Sports Health*: 19417381211071010.
- Gray, Calum et al. 2011. « Magnetic Resonance Imaging with K-Means Clustering Objectively Measures Whole Muscle Volume Compartments in Sarcopenia/Cancer Cachexia ». *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)* 30(1): 106-11.
- Gronwald, Thomas et al. 2022. « Hamstring Injury Patterns in Professional Male Football (Soccer): A Systematic Video Analysis of 52 Cases ». *British Journal of Sports Medicine* 56(3): 165-71.
- Guerini, Henri et al. 2015. « Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 19(4): 335-47.
- Guillodo, Yannick et al. 2014. « Clinical Predictors of Time to Return to Competition Following Hamstring Injuries ». *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 4(3): 386-90.

- Hägglund, M., M. Waldén, et J. Ekstrand. 2006. « Previous Injury as a Risk Factor for Injury in Elite Football: A Prospective Study over Two Consecutive Seasons ». *British Journal of Sports Medicine* 40(9): 767-72.
- Hägglund, Martin et al. 2013. « Injuries Affect Team Performance Negatively in Professional Football: An 11-Year Follow-up of the UEFA Champions League Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 47(12): 738-42.
- Hallén, Anna, et Jan Ekstrand. 2014. « Return to Play Following Muscle Injuries in Professional Footballers ». *Journal of Sports Sciences* 32(13): 1229-36.
- Hamilton, B. et al. 2014. « Excellent Reliability for MRI Grading and Prognostic Parameters in Acute Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1385-87.
- Hamilton, Bruce et al. 2018. « Cohen's MRI Scoring System Has Limited Value in Predicting Return to Play ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 26(4): 1288-94.
- Hayden, Jill A., Pierre Côté, et Claire Bombardier. 2006. « Evaluation of the Quality of Prognosis Studies in Systematic Reviews ». *Annals of Internal Medicine* 144(6): 427-37.
- Hegyi, A., A. Péter, T. Finni, et N. J. Cronin. 2018. « Region-Dependent Hamstrings Activity in Nordic Hamstring Exercise and Stiff-Leg Deadlift Defined with High-Density Electromyography ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 28(3): 992-1000.
- van Heumen, Moniek et al. 2017. « The Prognostic Value of MRI in Determining Reinjury Risk Following Acute Hamstring Injury: A Systematic Review ». *British Journal of Sports Medicine* 51(18): 1355-63.
- Hickey, Jack, Anthony J. Shield, Morgan D. Williams, et David A. Opar. 2014a. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- . 2014b. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- Hickey, Jack T., David A. Opar, Leigh J. Weiss, et Bryan C. Heiderscheit. 2022. « Hamstring Strain Injury Rehabilitation ». *Journal of Athletic Training* 57(2): 125-35.
- Higashihara, Ayako et al. 2010. « Functional Differences in the Activity of the Hamstring Muscles with Increasing Running Speed ». *Journal of Sports Sciences* 28(10): 1085-92.
- Hioki, Maya et al. 2020a. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- . 2020b. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- Hogrel, Jean-Yves et al. 2015. « NMR Imaging Estimates of Muscle Volume and Intramuscular Fat Infiltration in the Thigh: Variations with Muscle, Gender, and Age ». *Age (Dordrecht, Netherlands)* 37(3): 9798.

- Islam, S. et al. 2022. « Fully Automated Deep-Learning Section-Based Muscle Segmentation from CT Images for Sarcopenia Assessment ». *Clinical Radiology* 77(5): e363-71.
- Iversen, Erik, Vibeke Røstad, et Arne Larmo. 2016. « Intermittent Blood Flow Restriction Does Not Reduce Atrophy Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Journal of Sport and Health Science* 5(1): 115-18.
- Jacobsen, Phil et al. 2016. « A Combination of Initial and Follow-up Physiotherapist Examination Predicts Physician-Determined Time to Return to Play after Hamstring Injury, with No Added Value of MRI ». *British Journal of Sports Medicine* 50(7): 431-39.
- Kemnitz, Jana et al. 2020. « Clinical Evaluation of Fully Automated Thigh Muscle and Adipose Tissue Segmentation Using a U-Net Deep Learning Architecture in Context of Osteoarthritic Knee Pain ». *Magma (New York, N.Y.)* 33(4): 483-93.
- Kenneally-Dabrowski, Claire J. B. et al. 2019. « Late Swing or Early Stance? A Narrative Review of Hamstring Injury Mechanisms during High-Speed Running ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 29(8): 1083-91.
- Kilroe, Sean P. et al. 2020a. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- . 2020b. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- Koulouris, George, et David Connell. 2003. « Evaluation of the Hamstring Muscle Complex Following Acute Injury ». *Skeletal Radiology* 32(10): 582-89.
- . 2005. « Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 25(3): 571-86.
- Koulouris, George, David A. Connell, Peter Brukner, et Michal Schneider-Kolsky. 2007. « Magnetic Resonance Imaging Parameters for Assessing Risk of Recurrent Hamstring Injuries in Elite Athletes ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(9): 1500-1506.
- Kulas, Anthony S. et al. 2018. « Bilateral Quadriceps and Hamstrings Muscle Volume Asymmetries in Healthy Individuals ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 36(3): 963-70.
- Kumazaki, T., Y. Ehara, et T. Sakai. 2012. « Anatomy and Physiology of Hamstring Injury ». *International Journal of Sports Medicine* 33(12): 950-54.
- Le Troter, Arnaud et al. 2016. « Volume Measurements of Individual Muscles in Human Quadriceps Femoris Using Atlas-Based Segmentation Approaches ». *Magma (New York, N.Y.)* 29(2): 245-57.
- Lemes, Italo Ribeiro et al. 2021. « Do Exercise-Based Prevention Programmes Reduce Non-Contact Musculoskeletal Injuries in Football (Soccer)? A Systematic Review and Meta-Analysis with 13 355 Athletes and More than 1 Million Exposure Hours ». *British Journal of Sports Medicine* 55(20): 1170-78.
- Linklater, James M. et al. 2010. « Hamstring Injuries: Anatomy, Imaging, and Intervention ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 14(2): 131-61.

- Lins, Carolina Freitas, Carlos Ernesto Garrido Salmon, et Marcello Henrique Nogueira-Barbosa. 2021. « Applications of the Dixon Technique in the Evaluation of the Musculoskeletal System ». *Radiologia Brasileira* 54(1): 33-42.
- Liu, Jia, Kristi L. Lewton, Patrick M. Colletti, et Christopher M. Powers. 2021. « Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(11): 2346-53.
- Louis, Luck J. 2008. « Musculoskeletal Ultrasound Intervention: Principles and Advances ». *Radiologic Clinics of North America* 46(3): 515-33, vi.
- Macdonald, Ben et al. 2019. « Hamstring Rehabilitation in Elite Track and Field Athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in Clinical Practice ». *British Journal of Sports Medicine* 53(23): 1464-73.
- Mack, Christina D. et al. 2020. « Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018 ». *The American Journal of Sports Medicine* 48(9): 2287-94.
- Mackey, Abigail L., et Michael Kjaer. 2017. « The Breaking and Making of Healthy Adult Human Skeletal Muscle in Vivo ». *Skeletal Muscle* 7(1): 24.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Gustaaf Reurink, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Injury Is Not Associated with an Increased Hamstring Reinjury Rate within 12 Months after Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 52(19): 1261-66.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Rod Whiteley, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Involvement on MRI Has Limited Value for Predicting Time to Return to Play Following Acute Hamstring Injury ». *British Journal of Sports Medicine* 52(2): 83-88.
- Mallinson, Joanne E. et al. 2020. « Longitudinal Hypertrophic and Transcriptional Responses to High-Load Eccentric-Concentric vs Concentric Training in Males ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 30(11): 2101-15.
- Mandić, Mirko et al. 2020. « Automated Assessment of Regional Muscle Volume and Hypertrophy Using MRI ». *Scientific Reports* 10(1): 2239.
- McCormick, Matthew et al. 2014. « ITK: Enabling Reproducible Research and Open Science ». *Frontiers in Neuroinformatics* 8: 13.
- Mendez-Villanueva, Alberto et al. 2016. « MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players ». *PLoS One* 11(9): e0161356.
- Mendiguchia, Jurdan et al. 2017. « A Multifactorial, Criteria-Based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 49(7): 1482-92.
- Mense, Siegfried. 2003. « The Pathogenesis of Muscle Pain ». *Current Pain and Headache Reports* 7(6): 419-25.
- Millan, M. J. 1999. « The Induction of Pain: An Integrative Review ». *Progress in Neurobiology* 57(1): 1-164.

- Moher, D., B. Pham, M. L. Lawson, et T. P. Klassen. 2003. « The Inclusion of Reports of Randomised Trials Published in Languages Other than English in Systematic Reviews ». *Health Technology Assessment (Winchester, England)* 7(41): 1-90.
- Monti, Elena et al. 2020. « The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training ». *Frontiers in Physiology* 11: 946.
- Morin, Jean-Benoît et al. 2015. « Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production ». *Frontiers in Physiology* 6: 404.
- Morse, Christopher I., Hans Degens, et David A. Jones. 2007. « The Validity of Estimating Quadriceps Volume from Single MRI Cross-Sections in Young Men ». *European Journal of Applied Physiology* 100(3): 267-74.
- Mühlenfeld, Nils et al. 2021. « Assessment of Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Football Players after Hamstring Injuries ». *European Journal of Sport Science*: 1-9.
- Nescolarde, L. et al. 2015. « Effects of Muscle Injury Severity on Localized Bioimpedance Measurements ». *Physiological Measurement* 36(1): 27-42.
- Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. 2019. « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI) ». *Journal de Traumatologie du Sport*.
- Nguyen, Hoai-Thu et al. 2021. « Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(4): 869-81.
- Nordez, Antoine et al. 2009. « Comparison of Methods to Assess Quadriceps Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 30(5): 1116-23.
- Nuell, Sergi et al. 2019a. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- . 2019b. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PloS One* 14(11): e0224862.
- Opar, David A. et al. 2015. « The Effect of Previous Hamstring Strain Injuries on the Change in Eccentric Hamstring Strength during Preseason Training in Elite Australian Footballers ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(2): 377-84.
- Orchard, J., et H. Seward. 2002. « Epidemiology of Injuries in the Australian Football League, Seasons 1997-2000 ». *British Journal of Sports Medicine* 36(1): 39-44.
- O'Sullivan, Lucy, Jamie Preszler, et Miho Tanaka. 2022. « Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 17(6): 1184-93.
- Panisset, Maya G. et al. 2020. « Factors Influencing Thigh Muscle Volume Change with Cycling Exercises in Acute Spinal Cord Injury - a Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial ». *The Journal of Spinal Cord Medicine*: 1-12.

- Patel, A. et al. 2015. « British Athletics Muscle Injury Classification: A Reliability Study for a New Grading System ». *Clinical Radiology* 70(12): 1414-20.
- Paton, Bruce M. et al. 2023. « London International Consensus and Delphi Study on Hamstring Injuries Part 1: Classification ». *British Journal of Sports Medicine*: bjsports-2021-105371.
- Peetrons, P. 2002a. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- . 2002b. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- Pieters, Dries, Evi Wezenbeek, Joke Schuermans, et Erik Witvrouw. 2021. « Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It Is Time to Consider Natural Healing ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(10): 2067-77.
- Pollock, Noel et al. 2016a. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2016b. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2021. « A 4-Year Study of Hamstring Injury Outcomes in Elite Track and Field Using the British Athletics Rehabilitation Approach ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Pollock, Noel, Steven L. J. James, Justin C. Lee, et Robin Chakraverty. 2014a. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- . 2014b. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- Pomeranz, S. J., et R. S. Heidt. 1993. « MR Imaging in the Prognostication of Hamstring Injury. Work in Progress ». *Radiology* 189(3): 897-900.
- Pons, Christelle et al. 2018. « Quantifying Skeletal Muscle Volume and Shape in Humans Using MRI: A Systematic Review of Validity and Reliability ». *PLoS One* 13(11): e0207847.
- Rees, Huw et al. 2021. « The Burden of Injury in Field Hockey: A Secondary Analysis of Prospective Cohort Data ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 31(4): 884-93.
- Rettig, Arthur C., Susan Meyer, et Arup K. Bhadra. 2013a. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- . 2013b. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- Reurink, G., R. Whiteley, et J. L. Tol. 2015. « Hamstring Injuries and Predicting Return to Play: “Bye-Bye MRI?” ». *British Journal of Sports Medicine* 49(18): 1162-63.

- Reurink, Gustaaf et al. 2014. « MRI Observations at Return to Play of Clinically Recovered Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1370-76.
- Reurink, Gustaaf, Elisabeth G. Brilman, et al. 2015. « Magnetic Resonance Imaging in Acute Hamstring Injury: Can We Provide a Return to Play Prognosis? » *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45(1): 133-46.
- Reurink, Gustaaf, Emad Almusa, et al. 2015. « No Association between Fibrosis on Magnetic Resonance Imaging at Return to Play and Hamstring Reinjury Risk ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(5): 1228-34.
- Rubin, David A. 2012. « Imaging Diagnosis and Prognostication of Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 199(3): 525-33.
- Rush, Justin L., Grant E. Norte, et Adam S. Lepley. 2020. « Limb Differences in Hamstring Muscle Function and Morphology after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 45: 168-75.
- Safar Cherati, Afsaneh et al. 2016. « The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and Its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(3): e35289.
- Schache, Anthony G. et al. 2012. « Mechanics of the Human Hamstring Muscles during Sprinting ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(4): 647-58.
- Schneider-Kolsky, Michal E., Jan Lucas Hoving, Price Warren, et David A. Connell. 2006. « A Comparison between Clinical Assessment and Magnetic Resonance Imaging of Acute Hamstring Injuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(6): 1008-15.
- Sciascia, Aaron, Jacob Waldecker, et Cale Jacobs. 2020. « Pain Catastrophizing in College Athletes ». *Journal of Sport Rehabilitation* 29(2): 168-73.
- Shield, Anthony J., et Matthew N. Bourne. 2018. « Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 48(3): 513-24.
- Silder, Amy et al. 2013. « Clinical and Morphological Changes Following 2 Rehabilitation Programs for Acute Hamstring Strain Injuries: A Randomized Clinical Trial ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 43(5): 284-99.
- Slavotinek, John P., Geoffrey M. Verrall, et Gerald T. Fon. 2002. « Hamstring Injury in Athletes: Using MR Imaging Measurements to Compare Extent of Muscle Injury with Amount of Time Lost from Competition ». *AJR. American journal of roentgenology* 179(6): 1621-28.
- Söderman, K., H. Alfredson, T. Pietilä, et S. Werner. 2001. « Risk Factors for Leg Injuries in Female Soccer Players: A Prospective Investigation during One out-Door Season ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 9(5): 313-21.
- Souza, Jaqueline de, et Carmem Gottfried. 2013. « Muscle Injury: Review of Experimental Models ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 23(6): 1253-60.

- Speer, K. P., J. Lohnes, et W. E. Garrett. 1993. « Radiographic Imaging of Muscle Strain Injury ». *The American Journal of Sports Medicine* 21(1): 89-95; discussion 96.
- Sprague, Andrew L. et al. 2018. « Modifiable Risk Factors for Patellar Tendinopathy in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 52(24): 1575-85.
- Stępień, Karolina et al. 2019. « Anatomy of Proximal Attachment, Course, and Innervation of Hamstring Muscles: A Pictorial Essay ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 27(3): 673-84.
- Tate, Christine Marie, Glenn N. Williams, Peter J. Barrance, et Thomas S. Buchanan. 2006. « Lower Extremity Muscle Morphology in Young Athletes: An MRI-Based Analysis ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(1): 122-28.
- Timmins, Ryan G. et al. 2016. « Short Biceps Femoris Fascicles and Eccentric Knee Flexor Weakness Increase the Risk of Hamstring Injury in Elite Football (Soccer): A Prospective Cohort Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(24): 1524-35.
- Torğutalp, Şerife Şeyma et al. 2021. « Volume and T2 Relaxation Time Measurements of Quadriceps Femoris and Hamstring Muscles Are Reliable and Reproducible ». *Turkish Journal of Medical Sciences* 51(4): 2007-14.
- Trappe, T. A., D. M. Lindquist, et J. A. Carrithers. 2001a. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- . 2001b. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- Verrall, G. M. et al. 2001. « Clinical Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury: A Prospective Study with Correlation of Injury by Magnetic Resonance Imaging ». *British Journal of Sports Medicine* 35(6): 435-39; discussion 440.
- Verrall, G. M., Y. Kalairajah, J. P. Slavotinek, et A. J. Spriggins. 2006. « Assessment of Player Performance Following Return to Sport after Hamstring Muscle Strain Injury ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 9(1-2): 87-90.
- Verrall, Geoffrey M. et al. 2006. « Assessment of Physical Examination and Magnetic Resonance Imaging Findings of Hamstring Injury as Predictors for Recurrent Injury ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 36(4): 215-24.
- Verrall, Geoffrey M., John P. Slavotinek, Peter G. Barnes, et Gerald T. Fon. 2003. « Diagnostic and Prognostic Value of Clinical Findings in 83 Athletes with Posterior Thigh Injury: Comparison of Clinical Findings with Magnetic Resonance Imaging Documentation of Hamstring Muscle Strain ». *The American Journal of Sports Medicine* 31(6): 969-73.
- Vivodtzev, Isabelle et al. 2018. « Quadriceps Muscle Fat Infiltration Is Associated with Cardiometabolic Risk in COPD ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 38(5): 788-97.
- Walsh, Meghan et al. 2012. « Lower Extremity Muscle Activation and Knee Flexion during a Jump-Landing Task ». *Journal of Athletic Training* 47(4): 406-13.
- Wangensteen, Arnlaug et al. 2015. « MRI Does Not Add Value over and above Patient History and Clinical Examination in Predicting Time to Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A

- Prospective Cohort of 180 Male Athletes ». *British Journal of Sports Medicine* 49(24): 1579-87.
- . 2016. « Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 44(8): 2112-21.
- Wangenstein, Arnlaug, Johannes L. Tol, et al. 2017. « Intra- and Interrater Reliability of Three Different MRI Grading and Classification Systems after Acute Hamstring Injuries ». *European Journal of Radiology* 89: 182-90.
- Wangenstein, Arnlaug, Roald Bahr, et al. 2017. « MRI Appearance Does Not Change in the First 7 Days after Acute Hamstring Injury-a Prospective Study ». *British Journal of Sports Medicine* 51(14): 1087-92.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2018. « New MRI Muscle Classification Systems and Associations with Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Study ». *European Radiology* 28(8): 3532-41.
- Weber, Kenneth A. et al. 2019. « Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury ». *Scientific Reports* 9(1): 7973.
- Williams, Sean, Grant Trewartha, Simon Kemp, et Keith Stokes. 2013. « A Meta-Analysis of Injuries in Senior Men's Professional Rugby Union ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 43(10): 1043-55.
- Williamson, Amelia, et Barbara Hoggart. 2005. « Pain: A Review of Three Commonly Used Pain Rating Scales ». *Journal of Clinical Nursing* 14(7): 798-804.
- Woods, C. et al. 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.
- Wu, Y. F. et al. 2021. « [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging] ». *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 53(5): 843-49.
- Yamauchi, Koun, Chisato Kato, et Takayuki Kato. 2019. « Characteristics of Individual Thigh Muscles Including Cross-Sectional Area and Adipose Tissue Content Measured by Magnetic Resonance Imaging in Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study ». *Rheumatology International* 39(4): 679-87.
- Yang, Zepa et al. 2023. « Deep Learning-Based Pectoralis Muscle Volume Segmentation Method from Chest Computed Tomography Image Using Sagittal Range Detection and Axial Slice-Based Segmentation ». *PLoS One* 18(9): e0290950.

Table and Figures

Tables

Table 1

	<i>All clinical mechanisms of injury</i>	<i>Injury during the run</i>	<i>Injury with stretching mechanism</i>	<i>Injury during a jump</i>	<i>Other injury mechanisms</i>	<i>Chi2; p-value</i>
<i>Numbers (%)</i>	71	47	8	9	7	
<i>Physical characteristics of the population</i>						
<i>Age (years) (mean (SD))</i>	26.3 (7.4)	24.6 (6.5)	33.3 (8.1)	27.8 (46)	29.3 (5.6)	
<i>Age (years) (range)</i>	(18-47)	(18-40)	(26-47)	(8.9-20)	(20-34)	
<i>Height (cm) (mean (SD))</i>	181.1 (6.9)	181.3 (6.5)	177.4 (5.4)	181.3 (10.4)	184 (5.4)	
<i>Weight (kg) (mean (SD))</i>	77.9(10.4)	77.3 (10.9)	76.0 (6.0)	80.7 (13.7)	80.3 (6.0)	
<i>BMI (kg.m⁻²) (mean (SD))</i>	23.7 (2.5)	23.5 (2.8)	24.2 (1.6)	24.4 (2.8)	23.7 (1.4)	
<i>Demographic characteristics of the population</i>						
<i>Sports</i>						
<i>Soccer</i>	26 (36.6)	16 (34.0)	4 (50.0)	1 (11.1)	5 (71.4)	
<i>Track and field</i>	26 (36.6)	21 (44.7)	0 (0)	5 (55.6)	0 (0)	
<i>Trail</i>	5 (7.0)	4 (8.5)	0 (0)	0 (0)	1 (14.3)	
<i>Basketball</i>	6 (8.5)	3 (6.4)	0 (0)	2 (22.2)	1 (14.3)	
<i>Other</i>	8 (11.3)	3 (6.4)	4 (50.0)	1 (11.1)	0 (0)	
<i>Sport level</i>						

<i>Professional</i>	20 (28.2)	16 (34.0)	1 (12.5)	1 (11.1)	2 (28.6)	
<i>Semi-professional/national</i>	21 (29.5)	17 (36.2)	1 (12.5)	3 (33.3)	0 (0)	
<i>Amateur</i>	30 (42.3)	14 (29.8)	6 (75.0)	5 (55.6)	5 (71.4)	
Medical history (n %)						
<i>Previous hamstring muscle injury</i>	41 (57.7)	30 (63.8)	2 (25.0)	6 (66.6)	3 (42.8)	
<i>Without previous hamstring muscle injury</i>	30 (42.3)	17 (36.2)	6 (75.0)	3 (33.3)	4 (57.2)	
MRI characteristics of the lesions (n %)						
<i>Number of muscle affected</i>						
<i>Only one muscle</i>	52 (73.2)	34 (72.3)	6 (75.0)	7 (77.8)	5 (71.4)	
<i>More than one muscle</i>	19 (26.8)	13 (27.7)	2 (25.0)	2 (22.2)	2 (28.6)	
<i>Muscle involved</i>						6,86; 0.33347
<i>BF</i>	47 (66.2)	33 (70.1)	3 (37.5)	5 (55.6)	6 (85.7)	
<i>ST</i>	6 (8.5)	4 (8.5)	1 (12.5)	0 (0)	1 (14.3)	
<i>SM</i>	18 (25.4)	10 (21.3)	4 (50.0)	4 (44.4)	0 (0)	
<i>Localisation</i>						20.28; 0.16136
<i>Proximal third</i>	10 (14.1)	8 (17.0)	1 (12.5)	1 (11.1)	0 (0)	
<i>Middle and proximal third</i>	5 (7.0)	3 (6.4)	2 (25.0)	0 (0)	0 (0)	
<i>Middle third</i>	24 (33.8)	19 (40.4)	1 (12.5)	2 (22.2)	2 (28.6)	
<i>Middle and distal third</i>	6 (8.5)	2 (4.3)	0 (0)	2 (22.2)	2 (28.6)	
<i>Distal third</i>	19 (26.8)	13 (27.7)	2 (25.0)	2 (22.2)	2 (28.6)	
<i>All three</i>	7 (9.9)	2 (4.3)	2 (25.0)	2 (22.2)	1 (14.3)	

<i>Peetrons' grade* (n %)</i>						23.7; 0.00058*
<i>Grade 1</i>	19 (26.8)	16 (34.0)	1 (12.5)	2 (22.2)	0 (0)	
<i>Grade 2</i>	48 (67.6)	30 (63.8)	4 (50.0)	7 (77.8)	10 (100)	
<i>Grade 3</i>	4 (5.6)	1 (2.1)	3 (37.5)	0 (0)	0 (0)	
<i>Lesion volume</i>						
<i>(mL)(mean (SD))</i>	71.6 (105.1)	45.8 (64.6)	184.1 (218.1)	71.4 (6.0)	116.3 (96.7)	(F(3,67)=5.223; p=0.003)*
<i>(mL)(range)</i>	(0.2-671.2)	(0.2-342.2)	(20.9-671.2)	(6.0-201.4)	(8.3-235.3)	Run and Streching: p=0.02*
<i>Tissue localization* (n %)</i>						
<i>Musculo-Tendinous Junction</i>	52 (73.2)	35 (74.5)	5 (62.5)	7 (77.8)	5 (71.4)	
<i>Intratendinous</i>	5 (7.0)	2 (4.3)	2 (25.0)	0 (0)	1 (14.3)	
<i>Muscular only</i>	5 (7.0)	3 (6.4)	1 (12.5)	0 (0)	1 (14.3)	
<i>Musculo-Aponeurotic Junction</i>	9 (12.7)	7 (14.9)	0 (0)	2 (22.2)	0 (0)	

Table 1: Demographics of all patients and within each subcategory by mechanism of injury.

BF (Biceps Femoris); Semi-Tendinous (ST); Semi-Membranosous (SM); MRI (Magnetic Resonance Imaging).

Table 2

	<i>All clinical mechanisms of injury</i>	<i>Injury during the run</i>	<i>Injury with stretching mechanism</i>	<i>Injury during a jump</i>	<i>Other injury mechanisms</i>
Numbers (%)	71 (100)	47 (66.2)	8 (11.3)	9 (12.7)	7 (9.9)
BF	47 (66.2)	33 (46.5)	3 (4.2)	5 (7.0)	6 (8.5)
<i>Proximal third</i>	8 (11.3)	6 (8.5)	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)
<i>Middle and proximal third</i>	3 (4.2)	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle third</i>	15 (21.1)	12 (16.9)	0 (0)	1 (1.4)	2 (2.8)
<i>Middle and distal third</i>	3 (4.2)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	1 (1.4)
<i>Distal third</i>	15 (21.1)	11 (15.5)	1 (1.4)	1 (1.4)	2 (2.8)
<i>All three</i>	3 (4.2)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	1 (1.4)
ST	6 (8.5)	4 (5.6)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)
<i>Proximal third</i>	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle and proximal third</i>	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle third</i>	3 (4.2)	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle and distal third</i>	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)
<i>Distal third</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>All three</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
SM	18 (25.4)	10 (14.1)	4 (5.6)	4 (5.6)	0 (0)
<i>Proximal third</i>	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle and proximal third</i>	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)
<i>Middle third</i>	6 (8.5)	5 (7.0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)
<i>Middle and distal third</i>	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)
<i>Distal third</i>	4 (5.6)	2 (2.8)	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)
<i>All three</i>	4 (5.6)	1 (1.4)	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)

Table 2. Analysis of MRI locations of hamstring muscle injuries and within each subcategory by mechanism of injury. BF (Biceps Femoris); Semi-Tendinosous (ST); Semi-Membranosous (SM).

Figures

Figure 1

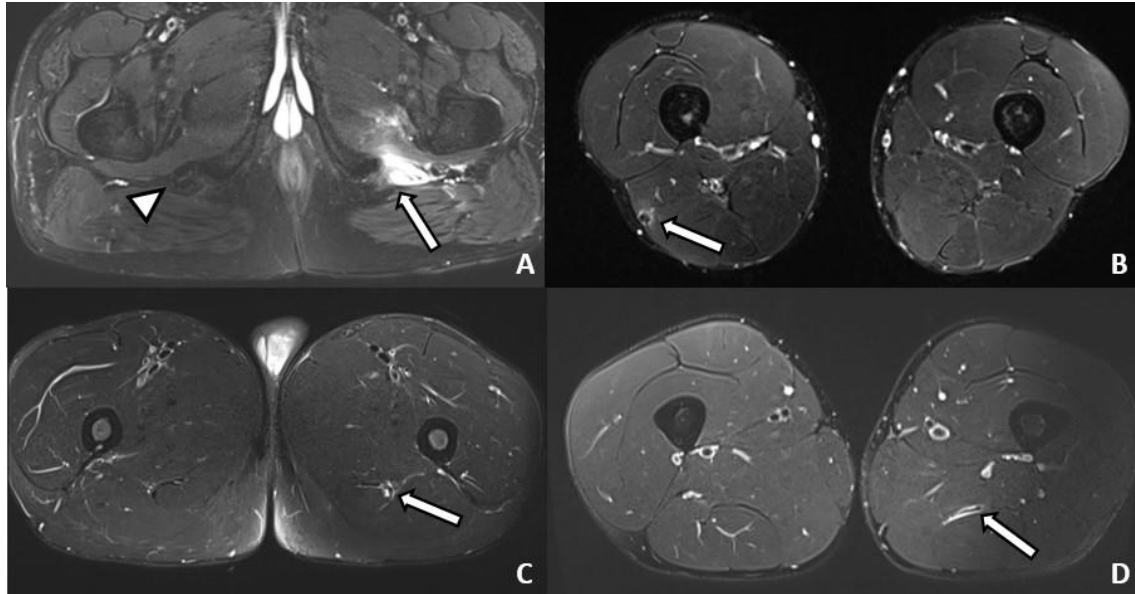


Figure 1. MRI images centered on hamstring muscle tears. T2 Fat Sat MRI images in axial centered on hamstring muscle tears. The first image (A) represents a left complete avulsion of the hamstring enthesis on the ischium, classified 3C by Peetron's namely the joint tendon (ST and LHBF) and the SM tendon. The tendons are no longer visible in contact with the ischium (arrow), whereas this is the case on the right side (arrowhead). The second one (B, arrow) represents a right distal tears of BF tendon, with a thickening of the tendon and a loss of the architectural organization of the tendon and the muscles (LH and SHBF) in contact, classified 2C by Peetron's. The third one (C, arrow) represents a proximal tear of the joint tendon, with a subtle thickening, classified 2C by Peetron's. The last one (D, arrow) represents a proximal tear of the SM tendon, with edema around the tendon but without architectural remodeling of it, classified 1C by Peetron's. BFLH (Biceps Femoris Long Head); BFSH (Biceps Femoris Short Head); Semi-Tendinosous (ST); Semi-Membranosous (SM).

Figure 2

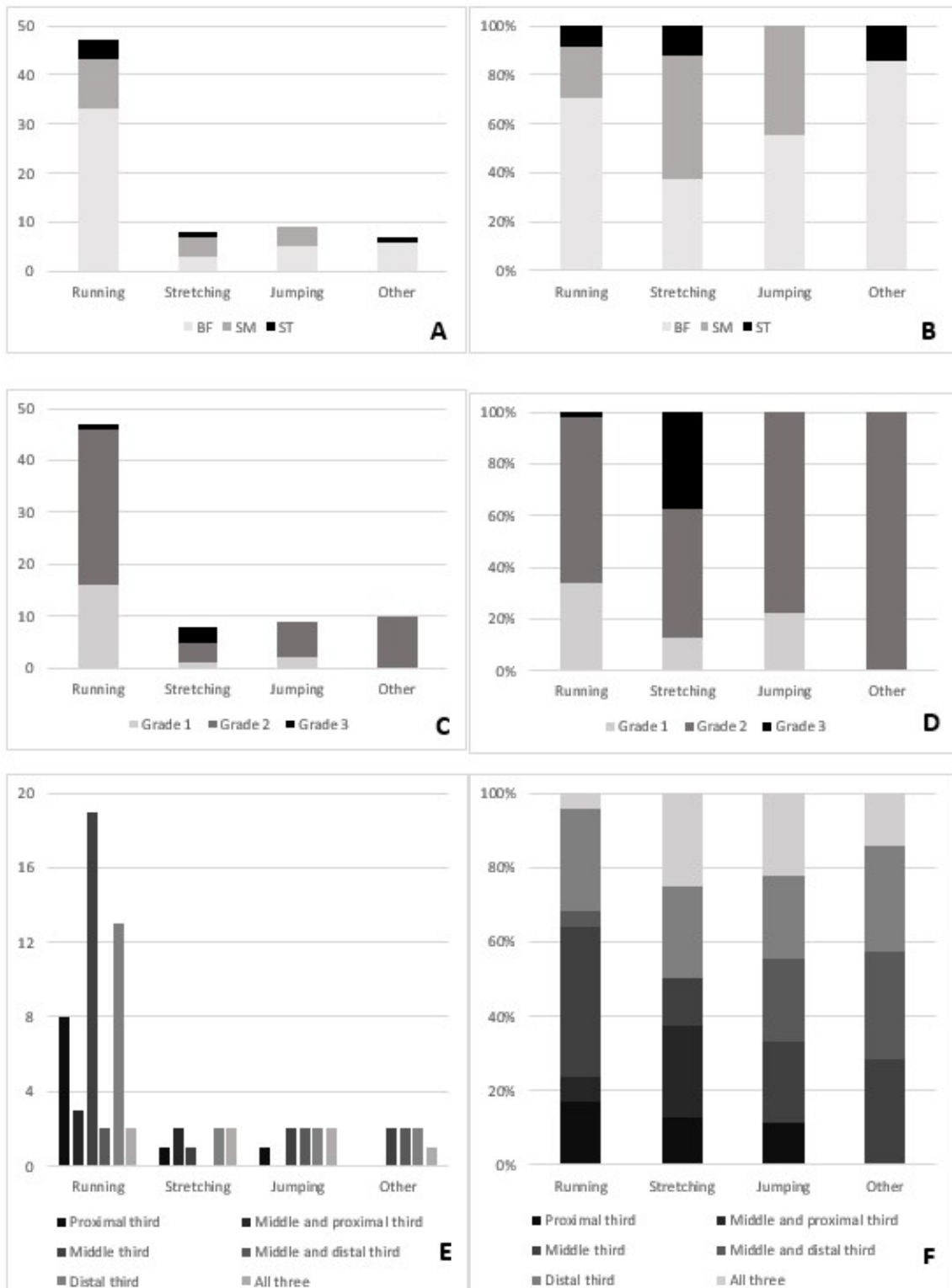


Figure 2. Proportion of muscle (A, B), lesion grade (C, D) and location (E, F) according to the lesion mechanism, expressed respectively in absolute (A, C, E) and relative (B, D, F).

Figure 3

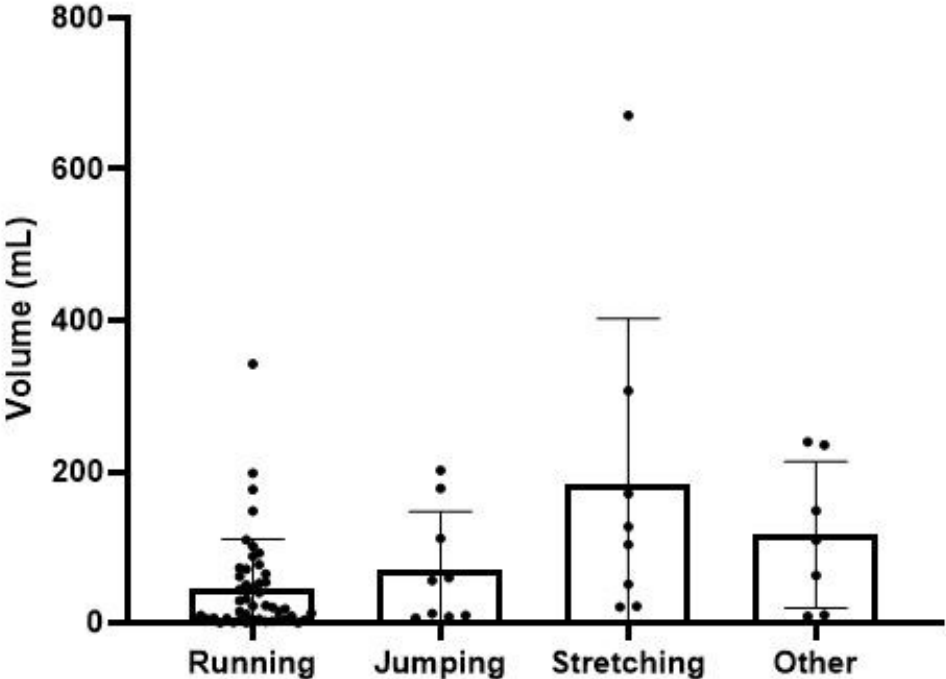


Figure 3. Lesion volume (mean, standard deviation and each value) expressed as a function of lesion mechanism.

Supplementary Data

Supplementary Data 1.

	T1 axial	T2 axial	T2 coronal
Slice thickness (mm)	5	5	5
Voxel size (mm)	0.8*0.8*5	0.8*0.8*5	0.8*0.8*5
Relaxation time (ms)	700	8500	6820
Echo Time (ms)	12	83	79
Field of View (mm)	380	380	380
Fat suppression	None	SPAIR	SPAIR
Water suppression	None	None	None
Dimensions	2	2	2
Temps d'acquisition	1min17s	2min36s	2min32s

Supplementary Data 1. MRI parameters.

Supplementary Data 2

		<i>Peetron's Grade</i>			<i>BAMIC grade* (n %)</i>									
<i>Numbers (%)</i>	<i>Numbers (%)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1A</i>	<i>1B</i>	<i>1C</i>	<i>2A</i>	<i>2B</i>	<i>2C</i>	<i>3A</i>	<i>3B</i>	<i>3C</i>	<i>4</i>
<i>BF</i>	47 (66.2)	13 (18.3)	32 (45.1)	2 (2.8)	1 (1.4)	7 (9.9)	0 (0)	3 (4.2)	14 (19.7)	2 (2.8)	0 (0)	18 (25.3)	1 (1.4)	1 (1.4)
<i>Musculo-Tendinous Junction</i>	38 (53.5)	9 (12.7)	27 (38.0)	2 (2.8)	0 (0)	6 (8.4)	0 (0)	0 (0)	14 (19.7)	2 (2.8)	0 (0)	15 (21.1)	0 (0)	1 (1.4)
<i>Intratendinous</i>	3 (4.2)	1 (1.4)	2 (2.8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)
<i>Muscular only</i>	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Musculo-Aponeurotic Junction</i>	5 (7.0)	2 (2.8)	3 (4.2)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	3 (4.2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)
<i>ST</i>	6 (8.5)	2 (2.8)	4 (5.6)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	2 (2.8)	0 (0)	0 (0)	2 (2.8)	0 (0)	0 (0)
<i>Musculo-Tendinous Junction</i>	5 (7.0)	1 (1.4)	4 (5.6)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	2 (2.8)	0 (0)	0 (0)	2 (2.8)	0 (0)	0 (0)
<i>Intratendinous</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Muscular only</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Musculo-Aponeurotic Junction</i>	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>SM</i>	18 (25.3)	4 (5.6)	12 (16.9)	2 (2.8)	2 (2.8)	1 (1.4)	0 (0)	4 (5.6)	5 (7.0)	0 (0)	1 (1.4)	3 (4.2)	0 (0)	2 (2.8)
<i>Musculo-Tendinous Junction</i>	9 (12.7)	1 (1.4)	7 (9.9)	1 (1.4)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	4 (5.6)	0 (0)	0 (0)	3 (4.2)	0 (0)	1 (1.4)
<i>Intratendinous</i>	2 (2.8)	0 (0)	1 (1.4)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)
<i>Muscular only</i>	4 (5.6)	2 (2.8)	2 (2.8)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	3 (4.2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Musculo-Aponeurotic Junction</i>	3 (4.2)	1 (1.4)	2 (2.8)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	1 (1.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

Supplementary Data 2: Analysis of MRI grade and localization of hamstring muscle injuries. BF (Biceps Femoris); Semi-Tendinosous (ST); Semi-Membranosous (SM)

3- Discussion

Les principaux résultats de notre étude étaient l'absence d'association significative entre le mécanisme lésionnel de la blessure des IJ ni avec le muscle affecté ni avec la position du muscle, et qu'il y a une association significative entre le mécanisme de la blessure des IJ avec le grade et avec le volume de la blessure évalué par IRM, avec un grade plus élevé (portion importante de grade 3) et un volume plus important avec le mécanisme d'étirement.

Nos résultats rapportaient un lien entre le mécanisme clinique et le degré de gravité, ainsi qu'entre ce mécanisme clinique et le volume lésionnel. Nos résultats ont montré que le grade et le volume étaient plus élevés lors d'un étirement que lors d'un sprint. De plus, il existait une part importante de grade 3 dans le mécanisme d'étirement, ce qui n'est pas le cas dans les autres types de mécanisme. Cela pourrait être lié au fait que lors d'un étirement, les structures tendineuses et aponévrotiques seraient davantage soumises à des forces de stress et donc plus facilement lésées. Ainsi, la prise en compte du mécanisme lésionnel semble donc important, d'autant que les lésions des ischio-jambiers qui s'étendent au tendon sont plus susceptibles de se reproduire et de retarder le retour à l'entraînement complet (Pollock et al. 2016b). Au vu de ce travail, on peut donc dire que le fait qu'une lésion survienne suite à un mécanisme d'étirement est un argument supplémentaire pour porter une attention particulière et faire discuter un examen d'imagerie.

Certaines limites de notre étude doivent être reconnues. Tout d'abord, il est possible qu'il y ait eu un biais de mémoire lorsque les patients ont rempli le questionnaire. Toutefois, les IRM ont été réalisées peu de temps après la blessure. En outre, la blessure a souvent été un événement marquant pour les sportifs et ils se souviennent très bien du moment de la blessure et de son mécanisme. Par ailleurs, nous pouvons considérer que notre échantillon de patients est petit par rapport à certaines cohortes de la littérature, ce qui pourrait expliquer l'association non significative entre certains paramètres cliniques et les résultats de l'IRM.

En perspective, il nous semble intéressant de poursuivre les investigations sur d'autres paramètres cliniques, afin de pouvoir discuter au mieux de l'intérêt ou non de réaliser une IRM complémentaire à partir d'une intégration des différents paramètres cliniques. Il s'agit en effet d'une grande question non résolue : quand réaliser un examen complémentaire en cas de suspicion de lésion musculaire des ischio-jambiers ?

F - Lien entre la lésion et le risque de récurrence « POST-HAMMER »

1- Objectifs

Le taux de récurrence après un premier épisode de blessure des IJ est extrêmement élevé (G. M. Verrall et al. 2001; Woods et al. 2004). Ces récurrences étant souvent décrites comme plus graves et avec un retour à la compétition plus long (Koulouris et al. 2007). Une approche pourrait être de mieux identifier les sportifs à haut risque de récurrence afin de réduire ce risque. Afin d'en avoir une meilleure compréhension, l'intérêt doit être porté sur les données initiales de la première lésion afin d'identifier les facteurs de risque de récurrence. Cela pourrait permettre de mieux cibler les sujets les plus à risque de récurrence et trouver de nouvelles pistes de prévention secondaire, par la mise en place de programmes de rééducation et de réentraînement plus personnalisés afin de minimiser ce risque. Dans ce contexte, l'objectif principal de notre étude a été d'analyser l'association entre les caractéristiques initiales d'une lésion musculaire des ischio-jambiers à l'IRM et une éventuelle récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Les objectifs secondaires étaient de rechercher des facteurs de risque sur les critères démographiques des patients (sexe, âge, IMC), mais aussi les critères cliniques (mécanisme de la blessure, douleur initiale et à 24 heures, niveau de fatigue), et enfin de décrire les éventuelles conséquences fonctionnelles et les modifications dans la pratique sportive à la suite d'une lésion musculaire des ischio-jambiers.

2- Article « POST-HAMMER »

“Association entre les caractéristiques initiales cliniques et IRM d’une lésion musculaire des ischio-jambiers et le risque de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers »

Association between baseline clinical and MRI characteristics of hamstring muscle injury and risk of hamstring muscle injury recurrence”

Article publié dans la revue Journal de Traumatologie du Sport

RESUME

Introduction : Notre objectif principal était de rechercher une éventuelle association entre les caractéristiques IRM initiales d'une lésion musculaire des ischio-jambiers et une récurrence lésionnelle de lésion musculaire des ischio-jambiers. L'objectif secondaire était de rechercher d'éventuels facteurs de risque cliniques de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers.

Matériel et Méthodes : Nous avons utilisé les données recueillies dans le cadre de l'étude HAMMER (HAMstring MEchanics and MRI), étude de cohorte prospective, multicentrique, non interventionnelle, qui consistait en la réalisation d'une IRM lors d'une suspicion clinique d'une lésion musculaire des ischio-jambiers. Nous avons recontacté les patients au moins 3 mois après leur lésion initiale des ischio-jambiers afin de les interroger sur une éventuelle récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers ainsi que des éventuelles conséquences fonctionnelles. Ont aussi été inclus les patients de la cohorte HAMMER vus une seconde fois pour une récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers.

Résultats : Sur 69 patients avec une première lésion musculaire des ischio-jambiers, 38 patients ont pu être recontacté par téléphone. Douze avaient présenté une récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Trois patients non joignables avaient eu une récurrence inclus dans HAMMER. On retrouvait un lien entre la récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers et le faible volume lésionnel, sans autre caractéristique remnographique associée à la récurrence. Le plus jeune âge, le sexe masculin, un IMC plus bas et une douleur moins importante au moment de la blessure étaient des facteurs de risque significatif de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers.

Conclusions : Notre étude cas-témoin était novatrice. Elle a permis de montrer que le plus faible volume lésionnel, l'âge plus bas, le sexe masculin, un IMC bas et la plus faible douleur initiale étaient des facteurs de risque de récurrence. Ces résultats devraient aider à développer des stratégies pour manager le risque de récurrence.

Mots-clés : Muscle ; IRM ; ischio-jambiers ; récurrence ; facteurs de risque.

Abstract:

Introduction: Our main objective was to investigate a possible association between the initial MRI characteristics of hamstring muscle injury and recurrence of hamstring muscle injury. The secondary objective was to investigate possible clinical risk factors for recurrence of hamstring muscle injury.

Materials and Methods: We used the data collected in the HAMMER study (HAMstring MEchanics and MRi), a prospective, multicentre, non-interventional cohort study, which consisted of performing an MRI when a clinical suspicion hamstring muscle injury. We recontacted the patients at least 3 months after their initial hamstring injury in order to question them about a possible recurrence of hamstring muscle injury as well as possible functional consequences. Also included were patients from the HAMMER cohort seen a second time for a recurrence of hamstring muscle injury.

Results: Out of 69 patients with a first hamstring muscle injury, 38 patients could be contacted by telephone. Twelve had presented a recurrence of muscular lesion of the hamstrings. Three unreachable patients had a recurrence included in HAMMER. A link was found between recurrence of hamstring muscle lesion and low lesion volume, with no other remnographic characteristic associated with recurrence. Younger age, male sex, lower BMI and less pain at the time of injury were significant risk factors for recurrence of hamstring muscle injury.

Conclusions: Our case-control study was innovative. It showed that lower lesion volume, younger age, male gender, lower BMI and lower initial pain were risk factors for recurrence. These results could be of help to manage the risk of recurrence.

Keywords: Muscle; MRI; hamstrings; recidivism; risk factors.

1. Introduction

Les muscles ischio-jambiers sont impliqués dans de nombreux mouvements sportifs, notamment de sprint, d'accélération (Schache et al. 2012) ou de saut (Walsh et al. 2012). Ils sont donc mis à contribution dans beaucoup de sports, qu'ils soient collectifs ou individuels, pouvant expliquer le taux élevé de leurs lésions allant de 12 à 26% (Chang et al. 2020). Ce sont les lésions sans contact les plus fréquemment observées dans les sports impliquant des sprints et accélérations, et elles représentaient notamment 17% de toutes les blessures en championnats internationaux d'athlétisme (Edouard, Branco, et Alonso 2016b), et 19% de toutes les blessures en football professionnel (J. H. M. Brooks et al. 2005; John H. M. Brooks et al. 2006).

Ces lésions engendrent parfois une longue convalescence (J. T. Hickey et al. 2022; Woods et al. 2004) entraînant d'importantes répercussions sportives dans le monde professionnel ou amateur que ce soit sur un plan compétitif mais également financier (Gouttebauge et al. 2016; J. Hickey et al. 2014b; G. M. Verrall et al. 2001). Ces lésions entraînent des répercussions fonctionnelles non négligeables que ce soit une faiblesse musculaire, des douleurs chroniques, une durée de reprise du sport longue voire un changement de sport (John H. M. Brooks et al. 2006; Opar et al. 2015). Le taux de récurrence après un premier épisode a été rapporté comme étant important, allant de 14 à 63% en fonction des études (Ekstrand et al. 2022; Ekstrand, Waldén, et Hägglund 2016; Gabbe et al. 2006; Gouttebauge et al. 2016; M. Hägglund, Waldén, et Ekstrand 2006; Schneider-Kolsky et al. 2006; G. M. Verrall et al. 2001, 2006; Woods et al. 2004). Ces récurrences étant souvent décrites comme des blessures plus graves et avec un retour à la compétition plus long (Koulouris et al. 2007). Afin de réduire le risque de récurrence, une approche pourrait être de mieux identifier les sportifs à haut risque de récurrence. Ainsi, une meilleure compréhension des facteurs de risque de récurrence serait une aide dans cette stratégie de réduction du risque. L'intérêt porté sur les données initiales de la première lésion afin d'identifier les facteurs de risque de récurrence semble donc être une approche intéressante et représente un enjeu majeur pour les sportifs.

Dans la littérature, plusieurs études ont rapporté que les données de l'examen clinique étaient supérieures à celles de l'IRM pour estimer le délai de retour au sport (Schneider-Kolsky et al. 2006; Wangenstein et al. 2015). Cependant le lien éventuel entre ces données cliniques et le risque de récurrence n'a pas été analysé. Malgré ce manque d'association entre les éléments d'imagerie IRM

au moment de la lésion et la reprise du sport, l'IRM est très intéressante grâce à sa haute résolution pour apporter le diagnostic de certitude d'une part et aussi de localiser la lésion, le muscle atteint et son étendue (Koulouris et Connell 2003). Ceci permet de grader la lésion selon différentes classifications comme Peetrans (Peetrans 2002a) ou BAMIC (Pollock et al. 2014b) ce qui peut également avoir un intérêt pour le pronostic. Van Der Made *et al.* (van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018) et Pollock *et al.* (Pollock et al. 2016b) ont montré que la lésion intra-tendineuse était associée à une augmentation du délai à la reprise du sport et du risque de récurrence. D'autres études ont retrouvé une association entre le volume (van der Made, Almusa, Whiteley, et al. 2018; Pollock et al. 2014b), la longueur initiale de la lésion musculaire et une lésion de grade 1 (Rubin 2012) selon la classification de Peetrans (van Beijsterveldt et al. 2013) et le risque de récurrence. Une revue systématique de la littérature expliquait ces associations par l'existence de nombreux biais et ne rapportait finalement aucun lien significatif entre les variables IRM de la première lésion et la récurrence (van Heumen et al. 2017). Enfin, comme rapporté précédemment, les lésions des muscles ischio-jambiers surviennent souvent lors des mécanismes de sprint et d'accélération, notamment au moment de la phase tardive du swing, en raison d'une tension musculaire excessive causée par la contraction excentrique (Danielsson et al. 2020; Freckleton et Pizzari 2013; van Heumen et al. 2017; Morin et al. 2015; Rubin 2012). Aussi, il serait possible que le mécanisme lésionnel ait un impact sur le risque de récurrence ultérieure.

A la lecture de ces éléments, mieux comprendre l'éventuelle influence des caractéristiques de la lésion initiale sur le risque de récurrence pourrait nous permettre de mieux cibler les sujets les plus à risque de récurrence et trouver de nouvelles pistes de prévention secondaire, par la mise en place de programmes de rééducation et de réentraînement plus personnalisés afin de minimiser ce risque. Dans ce contexte, l'objectif principal de notre étude a été d'analyser l'association entre les caractéristiques initiales d'une lésion musculaire des ischio-jambiers à l'IRM et une éventuelle récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Les objectifs secondaires étaient de rechercher des facteurs de risque sur les critères démographiques des patients (sexe, âge, IMC), mais aussi les critères cliniques (mécanisme de la blessure, douleur initiale et à 24 heures, niveau de fatigue), et enfin de décrire les éventuelles conséquences fonctionnelles et les modifications dans la pratique sportive à la suite d'une lésion musculaire des ischio-jambiers.

2. Méthode

2.1. Protocole expérimental

Nous avons utilisé les données recueillies dans le cadre de l'étude prospective multicentrique, non interventionnelle HAMMER (acronyme de HAMstring MEchanics and mRi)(Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P 2019). L'étude HAMMER est une étude de cohorte prospective, multicentrique, non interventionnelle et qui consistait, d'une part, en la réalisation d'une IRM des deux cuisses chez un patient qui présentait une suspicion clinique d'une lésion musculaire des ischio-jambiers et, d'autre part, au remplissage d'un auto-questionnaire par le patient décrivant les circonstances et le mécanisme de sa blessure (Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P 2019). Le Comité de protection des personnes d'Île-de-France V (CPP IDF 5 : 17059) avait approuvé le protocole de l'étude (No ID-RBC : 2017-A03433-50). Notre présente étude a consisté aussi à recontacter les patients inclus dans la cohorte HAMMER au moins 3 mois après leur lésion initiale afin de recueillir des informations sur une éventuelle récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers et les potentielles conséquences fonctionnelles engendrées par celle-ci.

2.2. Population

Les patients inclus dans la cohorte HAMMER étaient recrutés dans deux centres de Radiologie : la clinique mutualiste et le Centre Hospitalo-Universitaire de Saint-Étienne. Les patients avaient été adressés soit par leur médecin traitant ou par un médecin du sport pour réaliser une IRM de la cuisse, devant une suspicion clinique de lésion musculaire des ischio-jambiers, survenue dans la pratique sportive. Les critères d'inclusion étaient les suivants : sportifs de loisir/amateurs, haut-niveau ou professionnels, âgés de 18 à 50 ans, adressés par leur médecin traitant, leur médecin du sport ou venant de leur propre gré dans une structure d'imagerie médicale pour la réalisation d'une IRM de la cuisse devant la suspicion d'une lésion aiguë des muscles ischio-jambiers survenue lors de la pratique sportive, datant de moins de 21 jours. Les critères d'exclusion étaient les suivants : antécédent de chirurgie du ligament croisé antérieur (LCA) avec prélèvement d'un tendon des ischio-jambiers, une lésion des ischio-jambiers survenue en dehors de la pratique sportive, un âge supérieur à 50 ans, une incapacité à comprendre la langue française.

2.3. Recueil des données

Dans le cadre de notre présente étude, nous avons donc utilisé les données IRM de la lésion musculaire initiale des ischio-jambiers (« index injury »), ainsi que les données cliniques recueillies avec le questionnaire, et nous avons recontacté par téléphone les patients inclus dans la cohorte HAMMER, au moins 3 mois après leur lésion initiale.

2.3.1. Données IRM initiales

La lésion initiale musculaire des ischio-jambiers (« index injury ») était définie par une douleur aiguë de la loge postérieure de la cuisse, d'origine traumatique ou liée à une sollicitation excessive du groupe musculaire des ischio-jambiers. L'IRM pratiquée pour l'Index Injury (HAMMER) devait se dérouler dans un délai de 21 jours maximum après la survenue de la lésion. Pour que les patients soient inclus dans l'étude, il était nécessaire que l'IRM ait été faite sur des machines datant de moins de 5 ans et avec un champ magnétique de 1,5 T minimum. Des séquences en coupes axiales et coronales en pondération T1 et T2 devaient avoir été réalisées. Le champ de vue devait couvrir l'insertion proximale musculo-tendineuse au niveau de la tubérosité ischiatique ainsi que l'insertion distale au niveau de la tête de la fibula et l'extrémité proximale du tibia. L'épaisseur de coupe pour les différentes séquences devait être de 5 mm pour un pas de 0,5 mm. Le même radiologue sénior a interprété l'ensemble des différentes IRM réalisées lors des vacances d'imagerie du centre de radiologie de la clinique mutualiste ou de l'hôpital Nord, et remplissait à la fin un questionnaire « radiologue » décrivant la sémiologie radiologique IRM de la lésion des ischio-jambiers et leur topographie. Les principales données recueillies étaient : le nombre de muscles atteints (de 0 à 4), le nom du muscle ayant la lésion principale : biceps fémoral (BF), semi tendineux (ST) ou semi-membraneux (SM)), la structure anatomique atteinte (jonction myotendineuse (JMT), Jonction Myo-Aponévrotique (JMA), intra-tendineuse (IT), musculaire seul (M) ; le volume de lésion (en cm³) ; et la sévérité de la lésion selon la classification de Peetrons. Pour classer la sévérité des lésions en IRM, la classification modifiée de Peetrons (Peetrons 2002a) suivante a été utilisée : grade 0 : pas de lésion ; grade 1 : œdème sans anomalie de l'architecture musculo-tendineuse ; grade 2 : dégradation de l'architecture musculo-tendineuse correspondant à une rupture partielle ; grade 3 : rupture musculo-tendineuse complète. La distance entre la tubérosité ischiatique (insertion tendineuse proximale) et le centre de la lésion des ischio-jambiers

était mesurée en cm afin de classer les lésions selon trois topographies différentes : tiers proximal, tiers moyen et tiers distal, seuls ou associés.

2.3.2. Données cliniques initiales

Concernant les données cliniques, lors de la réalisation de l'IRM, il était demandé au patient de remplir un auto-questionnaire comportant ses caractéristiques physiques (âge, poids, taille) et sportives (niveau, type de sport pratiqué) et de décrire les circonstances de sa blessure, notamment le mécanisme lésionnel ayant entraîné la lésion des ischio-jambiers (course, étirement, saut, autre mécanisme).

2.3.3. Données de récurrence et/ou de conséquences

Nous avons recontacté par téléphone les patients inclus dans la cohorte HAMMER, au moins 3 mois après leur lésion initiale. Les patients étaient considérés comme non répondants en cas de coordonnées inexacts, d'absence de coordonnées ou après l'absence de réponse après 4 messages laissés sur leur répondeur. Pour les patients répondants, après leur avoir donné les explications sur l'objet de l'appel, une fois leur accord oral obtenu, des questions leur ont été posées en suivant le même ordre : 1) tout d'abord s'ils avaient présenté une récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers suivant la première lésion, 2) la latéralité de cette éventuelle lésion, et 3) si une IRM avait été pratiquée pour cette éventuelle récurrence, ensuite 4) leur ont été demandées la durée de retour au sport après leur première lésion, 5) s'ils avaient des douleurs à la reprise, 6) après la reprise et 7) maintenant (au jour de l'entretien téléphonique), et pour finir, 8) étaient recensées les éventuelles modifications dans leur échauffement et pratique sportive engendrées par la première lésion.

Une récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers était définie comme une douleur aiguë à la partie postérieure de la cuisse, peu importe la latéralité, suivant la reprise complète de la pratique sportive, et au moins 3 mois après la première blessure.

Étaient aussi considérés comme récurrence les patients ayant été inclus dans HAMMER pour une récurrence, même s'il n'était pas joignable pour remplir le questionnaire.

Les patients étaient ensuite classés en 2 groupes : ceux ayant présenté une récurrence et ceux indemnes de récurrence. Les patients étaient classés en récurrence soit à partir de l'appel téléphonique, soit à partir d'une récurrence incluse dans la cohorte HAMMER.

2.4. Variables analysées

Les variables analysées étaient :

- les caractéristiques anthropométriques de la population (sexe, âge, taille, poids, IMC) ;
- les caractéristiques démographiques et cliniques de la population (sport pratiqué, mécanisme clinique, niveau sportif, douleur au moment de la blessure et à 24 heures, le niveau de fatigue) ;
- les caractéristiques IRM de la lésion musculaire des ischio-jambiers (nombre de muscles concernés, grade lésionnel, muscle concerné, localisation proximo-centro-distale, localisation tissulaire, volume lésionnel) ;
- la survenue d'une récurrence, permettant de classer la population en 2 groupes ;
- les caractéristiques de la reprise du sport (durée de l'arrêt du sport avant reprise, présence d'une douleur à la reprise du sport) ;
- les modifications de la pratique sportive (arrêt ou changement de sport, modification de l'entraînement, apparition d'une appréhension à la reprise du sport).

2.5. Analyse statistique

Nous avons d'abord réalisé une analyse descriptive des variables sous formes de fréquence et de pourcentage pour les variables qualitatives et sous forme de moyenne avec écart-type ainsi que le minimum et maximum pour les variables quantitatives. Les données suivaient une loi normale. Nous avons ensuite comparé les variables entre les deux groupes (récurrence vs. sans récurrence) en utilisant le test du Chi 2 pour comparer les variables qualitatives, et le T-Student pour les variables quantitatives. Les résultats ont été considérés comme significatifs si $p < 0,05$. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide d'Excel.

3. Résultats

3.1. Population

La cohorte HAMMER recensait un total de 69 patients venus pour réaliser une IRM des ischio-jambiers pour une première lésion musculaire des ischio-jambiers, devant la suspicion clinique d'une lésion initiale des muscles ischio-jambiers. Les IRM se sont déroulées entre le 22 septembre

2017 et le 30 mars 2022 dans 2 centres d'imagerie de Saint-Etienne, à savoir la clinique mutualiste et le CHU de Saint-Etienne. L'ensemble des 69 patients a donc été rappelé, parmi lesquels 31 étaient injoignables. 38 patients ont donné leur accord et 38 patients ont pu donc être interrogés. Douze avaient présenté une récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Parmi les patients injoignables, 3 avaient présentés une récurrence dans HAMMER et ont donc pu être inclus dans le groupe récurrence. Ainsi, 15 patients ont été inclus dans le groupe récurrence et 26 dans le groupe sans récurrence. Le délai moyen entre la première lésion musculaire des ischio-jambiers et le rappel était de 803 (± 437) jours, sans différence significative entre les groupes avec ou sans récurrence. La durée moyenne entre la première lésion musculaire des ischio-jambiers et la récurrence était de 245 (± 189) jours.

3.2. Caractéristiques remnographiques (IRM)

Les caractéristiques remnographiques (IRM) de la population et des deux groupes « récurrence » et « sans récurrence » sont présentées dans le Tableau 1. On retrouvait une différence statistiquement significative entre la récurrence et le faible volume lésionnel lors de la lésion initiale ($p=0.0002$). L'analyse comparative n'a pas retrouvé de différences significatives entre les deux groupes « récurrence » et « sans récurrence » concernant le grade, le muscle touché, le nombre de muscle atteint, la localisation proximo-distale ou la structure tissulaire concernée. La Figure 1 présente deux IRM, une lors de la première blessure des ischio-jambiers, la deuxième 9 mois plus tard lors de la récurrence.

3.3. Caractéristiques cliniques

Les caractéristiques cliniques de la population et des deux groupes « récurrence » et « sans récurrence » sont présentées dans le Tableau 1. L'analyse comparative a retrouvé une différence significative entre les deux groupes « récurrence » et « sans récurrence » pour le sexe (moins de femmes dans le groupe récurrence, $p=0,017$), l'âge (moyenne d'âge plus faible dans le groupe récurrence, $p=0,007$), un IMC plus faible ($p=0,007$) ainsi qu'une douleur initiale moins importante ($p=0,03$).

3.5. Caractéristiques de la reprise sportive et modifications des pratiques (Tableau 2)

La durée d'arrêt du sport suite à la lésion musculaire initiale des ischio-jambiers était de $9,0 \pm 7,3$ semaines, sans différence significative entre les groupes récurrence et sans récurrence ($p=0,38$). L'arrêt

ou le changement de sport suite à la lésion musculaire initiale des ischio-jambiers était très rare (7,9%), sans différence entre les deux groupes ($p=0,95$). Concernant la douleur à la reprise sportive, on ne retrouvait pas non plus de différence significative entre les deux groupes. La modification de l'entraînement était par contre très fréquente 84,2%, mais sans différence entre les groupes ($p=0,92$). On notait de même une fréquente appréhension (66,7% des patients), sans différence entre les groupe ($p=0,71$).

4. Discussion

Les résultats principaux de notre étude étaient 1) un volume lésionnel initial faible était le seul facteur de risque remnographique de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers, 2) le sexe masculin, l'âge moins élevé, un faible IMC et la faible douleur initiale étaient significativement associées à un risque plus élevé de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers, et 3) l'appréhension à la reprise sportive était très fréquente.

4.1. Données remnographiques et risque de récurrence

La littérature est peu étoffée concernant le lien entre les données remnographiques d'une lésion musculaire des ischio-jambiers et le risque de récurrence. Trois principaux articles se sont attelés à rechercher des facteurs de risque (Gibbs et al. 2004; Koulouris et al. 2007; Geoffrey M. Verrall et al. 2006). Dans notre étude, on retrouvait dans le groupe récurrence un volume lésionnel moins important. Cela semblait ne pas être en accord avec la littérature, qui retrouvait un risque de récurrence plus élevé en cas de volume lésionnel plus élevé (Gibbs et al. 2004; Koulouris et al. 2007). On pourrait effectivement s'attendre à ce qu'une atteinte plus importante (volume lésionnel plus important) augmente le risque de récurrence, ce qui est dans notre présente étude le contraire. D'après nos résultats, il semblerait qu'un faible volume lésionnel serait faussement rassurant, et inciterait donc à autant de vigilance qu'une lésion plus importante.

Le grade des lésions selon Peetrons ne retrouvait pas d'association significative avec la récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Ces résultats étaient concordants avec ceux d'Ekstrand *et al.* (Ekstrand et al. 2012) et de Koulouris *et al.* (Koulouris et al. 2007).

On notait aussi un risque de récurrence plus important pour les lésions du ST ou du BF que pour celles du SM, sans différence significative. On notait qu'une seule récurrence du SM sur les blessures initiales. Cela pourrait être lié au fait que le SM est souvent touché par un mécanisme lésionnel différent, à savoir un mécanisme d'étirement (Askling et al. 2007b).

Il apparaissait qu'il y a une forte tendance à la localisation proximale (associée ou non à une atteinte centrale), mais l'effectif était faible dans cette catégorie, la majorité des lésions concernaient le tiers central dans notre étude. La localisation proximo-distale de la blessure n'a été pas évaluée de manière claire en termes de risque de récurrence dans la littérature.

Le nombre de muscles touchés et la localisation tissulaire n'étaient pas un facteur de risque de récurrence dans notre étude, et cela semblait en rapport avec la littérature (Geoffrey M. Verrall et al. 2006).

4.2. Données cliniques et risque de récurrence

Sur les données physiques de la population, on notait un risque de récurrence moins important chez des patients plus âgés et de sexe féminin, ainsi qu'un faible IMC et une douleur moins importante. Dans la littérature, on retrouvait un risque moins important de lésion des ischio-jambiers chez les femmes, un temps plus long de réhabilitation après une blessure, et un risque de récurrence plus important (Dalton, Kerr, et Dompier 2015; O'Sullivan, Preszler, et Tanaka 2022; Söderman et al. 2001). Cette discordance avec notre étude pouvait être liée à un faible effectif féminin dans notre étude. Notre travail montrait un risque plus important de récurrence chez les plus jeunes. Dans la littérature, l'âge plus élevé était un facteur de risque de blessure (Freckleton et Pizzari 2013). Toutefois, nous n'avons pas retrouvé dans la littérature d'influence de l'âge comme facteur de risque de récurrence. On peut imaginer que le jeune âge et le sexe masculin comme facteur de risque de récurrence serait lié au fait que ces deux populations soient moins prudentes, et donc moins à même de respecter les consignes médicales de temps de repos avant la reprise, une rééducation assidue et une reprise progressive.

L'IMC plus faible était associé à un risque de récurrence. Dans la littérature, l'IMC ne semblait pas intervenir sur la fréquence des lésions des ischio-jambiers (Freckleton et Pizzari 2013). Comme dans la littérature, la taille ne semblait pas intervenir dans le risque de récurrence (Freckleton et Pizzari 2013).

La douleur au moment de la blessure était moins importante dans le groupe récurrence. Toutefois, les paramètres de la reprise sportive (durée de l'arrêt du sport, présence d'une douleur à la reprise sportive) et les modifications de la reprise sportive (arrêt ou changement de sport, modification de l'entraînement, appréhension) étaient relativement superposables entre les deux groupes.

On notait un nombre de récurrence important en athlétisme (63,6%) par rapport au football (42,9%), au trail (0,0%), au basketball (20,0%) ou pour les autres sports (12,5%). Cela pourrait être en lien avec le mécanisme de blessure. En effet, la course semblait plus propice à une récurrence (42,9%) que le mécanisme d'étirement (0,0%), que le saut (25,0%), ou les autres mécanismes (40,0%). De plus, on retrouvait aussi une tendance pour le niveau sportif, à savoir que les patients professionnels semblaient plus à même de se blesser à nouveau (57,1%), que les semi-professionnels (50,0%) ou les amateurs (25,0%).

On ne retrouvait pas de différence sur la durée d'arrêt du sport ($8,8 \pm 7,4$ avec récurrence et $9,0 \pm 7,3$ sans). De même, on ne retrouvait pas de différence concernant la douleur à la reprise sportive entre les deux groupes, avec 2/12 (16,7%) dans le groupe récurrence et 4/26 (15,4%) dans le groupe sans récurrence. On aurait pu s'attendre à une durée plus courte et une fréquence de douleur plus importante dans le groupe récurrence, ce qui n'est pas le cas ici.

L'arrêt ou le changement de sport était très rare dans les deux groupes sans différence entre les deux groupes. La modification de l'entraînement était par contre très fréquente (84,2%), mais sans différence entre les groupes avec ou sans récurrence. On notait de même une fréquente appréhension, avec 66,7% concernés, sans différence entre les deux groupes. Cela montre bien l'important retentissement des blessures des ischio-jambiers dans la pratique sportive (Dunlop et al. 2020). Enfin on constate tout de même que cette première blessure a entraîné pour une majeure partie, une intensification des mesures d'échauffement accés sur les ischio-jambiers avec

du renforcement, des étirements et des exercices spécifiques. Les sportifs seraient plus attentifs aux différents signaux notamment douloureux de leur corps et surtout des ischio-jambiers. Cela suggérerait que l'éducation du patient, la prévention, les explications données sur la blessure sont importantes et que le patient doit également être au cœur de la prise en charge pour une reprise optimale de son activité sportive en fonction de ses atteintes et objectifs (Dunlop et al. 2020).

L'incidence des blessures et leurs conséquences négatives sur le sportif justifient notre travail sur des sportifs variés issus de la cohorte HAMMER (Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P 2019). Les attentes à la fois des sportifs mais également des équipes médicales justifient la réalisation de notre étude afin d'augmenter nos connaissances à ce sujet pour personnaliser la prise en charge et mieux cibler la prévention. Même si la fréquence et la localisation des lésions musculaires des ischio-jambiers en IRM sont bien décrites dans la littérature (Grange et al. 2022), les facteurs de risque de récurrence sont toujours sujets à discussion. Sur le plan clinique, les résultats de cette étude mettent en évidence une douleur moindre dans le groupe récidive. Le mécanisme lésionnel de type course semble lié à un risque accru de récurrence, même si non significatif dans notre étude. Cela semble cohérent avec la biomécanique de l'accélération et le rôle biarticulaire des muscles ischio-jambiers dans ce geste sportif (Morin et al. 2015). Par ailleurs, le biceps fémoral (75,0%) et la jonction myotendineuse (83,3%) étaient les localisations les plus fréquemment touchées. Cependant, aucune association statistique avec la récurrence n'a été mise en évidence ce qui concorde avec les travaux de *Pollock et al.* (Pollock et al. 2016b).

4.3. Forces et limites

Tout d'abord, bien qu'il s'agisse d'une étude cas-témoins, les patients étaient tous issus de la même cohorte ce qui renforce leur comparabilité initiale. Ensuite, toutes les IRM ont été relues et interprétées par le même radiologue expert en pathologie de l'appareil locomoteur afin de s'affranchir de toute variabilité inter-observateur et de diminuer la variabilité intra-observateur. Nous avons également pu mettre en évidence l'impact de la première lésion, en terme fonctionnel et sur la reprise du sport, et les conséquences dans la pratique sportive actuelle.

Concernant les limites, on peut rapporter tout d'abord le design de l'étude : cas-témoins. Ensuite, la taille restreinte de l'échantillon analysé (n=41) et le nombre limité de récurrences (n=15). Ainsi, nos

résultats doivent donc être interprétés avec prudence. Ensuite, étant donné que nous avons procédé aux rappels des patients, on peut donc noter un biais de mémorisation. En revanche, les données cliniques et le mécanisme lésionnel étaient demandés au moment de la réalisation de l'IRM, qui survenait en moyenne moins de 8 jours après la blessure, limitant ce biais. Enfin, le délai variable de suivi des patients après la première lésion peut avoir une influence non négligeable sur les résultats des analyses de comparaison.

4.4. Perspectives

L'estimation de la récurrence reste un défi clinique et il est important d'identifier les facteurs de risque. Il pourrait être intéressant de reproduire ce design sur un échantillon plus important de patients. Enfin, on peut noter que l'appréhension au moment du retour au sport était fréquemment retrouvée dans notre étude, ce qui peut être également une piste de travail dans la prise en charge de ces patients lors de la reprise de leurs activités physiques. Il semble donc que la prévention et l'accompagnement du sportif soient très importantes après une blessure, avec pour objectif une reprise du sport, et si possible au même niveau que précédemment.

5. Conclusion

Notre étude cas-témoin était novatrice. Elle a permis de montrer que le plus faible volume lésionnel, l'âge plus bas, le sexe masculin, un IMC bas et la plus faible douleur initiale étaient des facteurs de risque de récurrence. Enfin, on notait que la première lésion entraînait des conséquences fonctionnelles très fréquentes, justifiant une prise en charge spécifique et une coopération étroite entre le patient, le clinicien et le rééducateur.

Références

- Agosti, Abramo et al. 2021. « Deep Learning for Automatic Segmentation of Thigh and Leg Muscles ». *Magma (New York, N.Y.)*.
- Albu, Alexandra Branzan, Trevor Beugeling, et Denis Laurendeau. 2008. « A Morphology-Based Approach for Interslice Interpolation of Anatomical Slices from Volumetric Images ». *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55(8): 2022-38.
- Asakawa, Deanna S., Silvia S. Blemker, Garry E. Gold, et Scott L. Delp. 2002. « In Vivo Motion of the Rectus Femoris Muscle after Tendon Transfer Surgery ». *Journal of Biomechanics* 35(8): 1029-37.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Tõnu Saartok, et Alf Thorstensson. 2007a. « Acute First-Time Hamstring Strains during High-Speed Running: A Longitudinal Study Including Clinical and Magnetic Resonance Imaging Findings ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(2): 197-206.
- . 2007b. « Acute First-Time Hamstring Strains during Slow-Speed Stretching: Clinical, Magnetic Resonance Imaging, and Recovery Characteristics ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(10): 1716-24.
- . 2008. « Proximal Hamstring Strains of Stretching Type in Different Sports: Injury Situations, Clinical and Magnetic Resonance Imaging Characteristics, and Return to Sport ». *The American Journal of Sports Medicine* 36(9): 1799-1804.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Olga Tarassova, et Alf Thorstensson. 2014. « Acute Hamstring Injuries in Swedish Elite Sprinters and Jumpers: A Prospective Randomised Controlled Clinical Trial Comparing Two Rehabilitation Protocols ». *British Journal of Sports Medicine* 48(7): 532-39.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, et Alf Thorstensson. 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): 953-59.
- Balius, Ramon et al. 2019. « Sonographic Landmarks in Hamstring Muscles ». *Skeletal Radiology* 48(11): 1675-83.
- Barnouin, Yoann et al. 2014. « Manual Segmentation of Individual Muscles of the Quadriceps Femoris Using MRI: A Reappraisal ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 40(1): 239-47.
- Baron, Jacqueline E., Emily A. Parker, Kyle R. Duchman, et Robert W. Westermann. 2020. « Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8(6): 2325967120930296.
- Baumgart, Christian et al. 2021. « Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(16): 8727.

- Becciolini, Marco, Giovanni Bonacchi, et Stefano Bianchi. 2019. « Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine* 38(5): 1367-82.
- Behan, Fearghal P., Thomas M. Maden-Wilkinson, Matt T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2018. « Sex Differences in Muscle Morphology of the Knee Flexors and Knee Extensors ». *PLoS One* 13(1): e0190903.
- van Beijsterveldt, A. M. C., I. G. L. van de Port, A. J. Vereijken, et F. J. G. Backx. 2013. « Risk Factors for Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Systematic Review of Prospective Studies ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23(3): 253-62.
- Beltran, Luis, Varand Ghazikhanian, Mario Padron, et Javier Beltran. 2012a. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- . 2012b. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- Besson, J. M. 1997. « [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain] ». *Drugs* 53 Suppl 2: 1-9.
- Birchmeier, Thomas et al. 2020. « Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 38(3): 598-608.
- Bland, J. M., et D. G. Altman. 1986. « Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement ». *Lancet (London, England)* 1(8476): 307-10.
- Bourne, M. N. et al. 2016. « Muscle Activation Patterns in the Nordic Hamstring Exercise: Impact of Prior Strain Injury ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(6): 666-74.
- Brandser, E. A. et al. 1995. « Hamstring Injuries: Radiographic, Conventional Tomographic, CT, and MR Imaging Characteristics ». *Radiology* 197(1): 257-62.
- Brooks, J. H. M., C. W. Fuller, S. P. T. Kemp, et D. B. Reddin. 2005. « A Prospective Study of Injuries and Training amongst the England 2003 Rugby World Cup Squad ». *British Journal of Sports Medicine* 39(5): 288-93.
- Brooks, John H. M., Colin W. Fuller, Simon P. T. Kemp, et Dave B. Reddin. 2006. « Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(8): 1297-1306.
- Buckthorpe, Matthew et al. 2021. « Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(4): 607-24.
- Campbell, Scot E., Ronald Adler, et Carolyn M. Sofka. 2005. « Ultrasound of Muscle Abnormalities ». *Ultrasound Quarterly* 21(2): 87-94; quiz 150, 153-54.

- Chan, Otto, Angelo Del Buono, Thomas M. Best, et Nicola Maffulli. 2012. « Acute Muscle Strain Injuries: A Proposed New Classification System ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 20(11): 2356-62.
- Chang, Justin S. et al. 2020. « Management of Hamstring Injuries: Current Concepts Review ». *The Bone & Joint Journal* 102-B(10): 1281-88.
- Cohen, Steven B. et al. 2011. « Hamstring Injuries in Professional Football Players: Magnetic Resonance Imaging Correlation with Return to Play ». *Sports Health* 3(5): 423-30.
- Connell, David A. et al. 2004. « Longitudinal Study Comparing Sonographic and MRI Assessments of Acute and Healing Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 183(4): 975-84.
- Constantin-Teodosiu, Dumitru, et Despina Constantin. 2021. « Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *International Journal of Molecular Sciences* 22(21): 11587.
- Crema, Michel D. et al. 2015. « Imaging Techniques for Muscle Injury in Sports Medicine and Clinical Relevance ». *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 8(2): 154-61.
- . 2016. « Acute Hamstring Injury in Football Players: Association between Anatomical Location and Extent of Injury-A Large Single-Center MRI Report ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19(4): 317-22.
- Crema, Michel D., Ivan R. B. Godoy, et al. 2018. « Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play ». *Sports Health* 10(1): 75-79.
- Crema, Michel D., Mohamed Jarraya, et al. 2018a. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- . 2018b. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- Dalton, Sara L., Zachary Y. Kerr, et Thomas P. Dompier. 2015. « Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(11): 2671-79.
- Danielsson, Adam et al. 2020. « The Mechanism of Hamstring Injuries - a Systematic Review ». *BMC musculoskeletal disorders* 21(1): 641.
- De Smet, A. A., et T. M. Best. 2000. « MR Imaging of the Distribution and Location of Acute Hamstring Injuries in Athletes ». *AJR. American journal of roentgenology* 174(2): 393-99.
- De Smet, AA, et TM Best. 2000. « MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes ». *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY* 174(2): 393-99.

De Vos, Robert-Jan et al. 2014. « Clinical Findings Just after Return to Play Predict Hamstring Re-Injury, but Baseline MRI Findings Do Not ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1377-84.

Delvaux, François et al. 2014. « Return-to-Play Criteria after Hamstring Injury: Actual Medicine Practice in Professional Soccer Teams ». *Journal of Sports Science & Medicine* 13(3): 721-23.

Dictionnaire Larousse.

Diemer, Willemijn M. et al. 2021. « Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million Sport Exposure Hours ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 51(1): 27-36.

Dorn, Tim W., Anthony G. Schache, et Marcus G. Pandy. 2012. « Muscular Strategy Shift in Human Running: Dependence of Running Speed on Hip and Ankle Muscle Performance ». *The Journal of Experimental Biology* 215(Pt 11): 1944-56.

Dunlop, Gordon et al. 2020. « Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 50(4): 829-40.

Edouard, Pascal et al. 2021a. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport*.

———. 2021b. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 24(7): 653-59.

Edouard, Pascal, Pedro Branco, et Juan-Manuel Alonso. 2016a. « 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): 619-30.

———. 2016b. « 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): 619-30.

Ekstrand, Jan et al. 2012. « Hamstring Muscle Injuries in Professional Football: The Correlation of MRI Findings with Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 46(2): 112-17.

———. 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): 292-98.

- Ekstrand, Jan, Martin Hägglund, et Markus Waldén. 2011. « Epidemiology of Muscle Injuries in Professional Football (Soccer) ». *The American Journal of Sports Medicine* 39(6): 1226-32.
- Ekstrand, Jan, Justin C. Lee, et Jeremiah C. Healy. 2016. « MRI Findings and Return to Play in Football: A Prospective Analysis of 255 Hamstring Injuries in the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 738-43.
- Ekstrand, Jan, Armin Spreco, Håkan Bengtsson, et Roald Bahr. 2021a. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- . 2021b. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Ekstrand, Jan, Markus Waldén, et Martin Hägglund. 2016. « Hamstring Injuries Have Increased by 4% Annually in Men's Professional Football, since 2001: A 13-Year Longitudinal Analysis of the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 731-37.
- Evangelidis, Pavlos E., Garry J. Massey, Matthew T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2016. « Strength and Size Relationships of the Quadriceps and Hamstrings with Special Reference to Reciprocal Muscle Balance ». *European Journal of Applied Physiology* 116(3): 593-600.
- Farrow, M. et al. 2021. « Quantitative MRI in Myositis Patients: Comparison with Healthy Volunteers and Radiological Visual Assessment ». *Clinical Radiology* 76(1): 81.e1-81.e10.
- Fedorov, Andriy et al. 2012. « 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network ». *Magnetic Resonance Imaging* 30(9): 1323-41.
- Fitzpatrick, Anna C., Adam S. Naylor, Peter Myler, et Colin Robertson. 2018. « A Three-Year Epidemiological Prospective Cohort Study of Rugby League Match Injuries from the European Super League ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21(2): 160-65.
- Fletcher, Amanda N., Jonathan W. Cheah, Shane J. Nho, et Richard C. Mather. 2021. « Proximal Hamstring Injuries ». *Clinics in Sports Medicine* 40(2): 339-61.
- Flores, Dyan V. et al. 2018. « MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 38(1): 124-48.
- Franchi, M. V. et al. 2014a. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.

- . 2014b. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.
- Francis, Peter et al. 2017. « Measurement of Muscle Health in Aging ». *Biogerontology* 18(6): 901-11.
- Freckleton, Grant, et Tania Pizzari. 2013. « Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 47(6): 351-58.
- Fried, T., et G. J. Lloyd. 1992. « An Overview of Common Soccer Injuries. Management and Prevention ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 14(4): 269-75.
- Frouin, Antoine et al. 2023. « Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes ». *Ultrasound in Medicine & Biology*: S0301-5629(23)00064-9.
- Fukunaga, T. et al. 2001. « Muscle Volume Is a Major Determinant of Joint Torque in Humans ». *Acta Physiologica Scandinavica* 172(4): 249-55.
- Gabbe, B. J. et al. 2006. « Predictors of Hamstring Injury at the Elite Level of Australian Football ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 16(1): 7-13.
- Geirsson, R. T., A. D. Christie, et N. Patel. 1982a. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- . 1982b. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- Gibbs, N. J., T. M. Cross, M. Cameron, et M. T. Houang. 2004. « The Accuracy of MRI in Predicting Recovery and Recurrence of Acute Grade One Hamstring Muscle Strains within the Same Season in Australian Rules Football Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 7(2): 248-58.
- Gibby, Wendell A. 2005. « Basic Principles of Magnetic Resonance Imaging ». *Neurosurgery Clinics of North America* 16(1): 1-64.
- Gouttebauge, Vincent, Brendan A. Hughes Schwab, Adam Vivian, et Gino M M J Kerkhoffs. 2016. « Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(1): e31385.
- Grange, Sylvain et al. 2022. « Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review ». *Sports Health*: 19417381211071010.
- Gray, Calum et al. 2011. « Magnetic Resonance Imaging with K-Means Clustering Objectively Measures Whole Muscle Volume Compartments in Sarcopenia/Cancer Cachexia ». *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)* 30(1): 106-11.

- Gronwald, Thomas et al. 2022. « Hamstring Injury Patterns in Professional Male Football (Soccer): A Systematic Video Analysis of 52 Cases ». *British Journal of Sports Medicine* 56(3): 165-71.
- Guerini, Henri et al. 2015. « Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 19(4): 335-47.
- Guillodo, Yannick et al. 2014. « Clinical Predictors of Time to Return to Competition Following Hamstring Injuries ». *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 4(3): 386-90.
- Häggglund, M., M. Waldén, et J. Ekstrand. 2006. « Previous Injury as a Risk Factor for Injury in Elite Football: A Prospective Study over Two Consecutive Seasons ». *British Journal of Sports Medicine* 40(9): 767-72.
- Häggglund, Martin et al. 2013. « Injuries Affect Team Performance Negatively in Professional Football: An 11-Year Follow-up of the UEFA Champions League Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 47(12): 738-42.
- Hallén, Anna, et Jan Ekstrand. 2014. « Return to Play Following Muscle Injuries in Professional Footballers ». *Journal of Sports Sciences* 32(13): 1229-36.
- Hamilton, B. et al. 2014. « Excellent Reliability for MRI Grading and Prognostic Parameters in Acute Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1385-87.
- Hamilton, Bruce et al. 2018. « Cohen's MRI Scoring System Has Limited Value in Predicting Return to Play ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 26(4): 1288-94.
- Hayden, Jill A., Pierre Côté, et Claire Bombardier. 2006. « Evaluation of the Quality of Prognosis Studies in Systematic Reviews ». *Annals of Internal Medicine* 144(6): 427-37.
- Hegyi, A., A. Péter, T. Finni, et N. J. Cronin. 2018. « Region-Dependent Hamstrings Activity in Nordic Hamstring Exercise and Stiff-Leg Deadlift Defined with High-Density Electromyography ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 28(3): 992-1000.
- van Heumen, Moniek et al. 2017. « The Prognostic Value of MRI in Determining Reinjury Risk Following Acute Hamstring Injury: A Systematic Review ». *British Journal of Sports Medicine* 51(18): 1355-63.
- Hickey, Jack, Anthony J. Shield, Morgan D. Williams, et David A. Opar. 2014a. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- . 2014b. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- Hickey, Jack T., David A. Opar, Leigh J. Weiss, et Bryan C. Heiderscheit. 2022. « Hamstring Strain Injury Rehabilitation ». *Journal of Athletic Training* 57(2): 125-35.

- Higashihara, Ayako et al. 2010. « Functional Differences in the Activity of the Hamstring Muscles with Increasing Running Speed ». *Journal of Sports Sciences* 28(10): 1085-92.
- Hioki, Maya et al. 2020a. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- . 2020b. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- Hogrel, Jean-Yves et al. 2015. « NMR Imaging Estimates of Muscle Volume and Intramuscular Fat Infiltration in the Thigh: Variations with Muscle, Gender, and Age ». *Age (Dordrecht, Netherlands)* 37(3): 9798.
- Islam, S. et al. 2022. « Fully Automated Deep-Learning Section-Based Muscle Segmentation from CT Images for Sarcopenia Assessment ». *Clinical Radiology* 77(5): e363-71.
- Iversen, Erik, Vibeke Røstad, et Arne Larmo. 2016. « Intermittent Blood Flow Restriction Does Not Reduce Atrophy Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Journal of Sport and Health Science* 5(1): 115-18.
- Jacobsen, Phil et al. 2016. « A Combination of Initial and Follow-up Physiotherapist Examination Predicts Physician-Determined Time to Return to Play after Hamstring Injury, with No Added Value of MRI ». *British Journal of Sports Medicine* 50(7): 431-39.
- Kemnitz, Jana et al. 2020. « Clinical Evaluation of Fully Automated Thigh Muscle and Adipose Tissue Segmentation Using a U-Net Deep Learning Architecture in Context of Osteoarthritic Knee Pain ». *Magma (New York, N.Y.)* 33(4): 483-93.
- Kenneally-Dabrowski, Claire J. B. et al. 2019. « Late Swing or Early Stance? A Narrative Review of Hamstring Injury Mechanisms during High-Speed Running ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 29(8): 1083-91.
- Kilroe, Sean P. et al. 2020a. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- . 2020b. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- Koulouris, George, et David Connell. 2003. « Evaluation of the Hamstring Muscle Complex Following Acute Injury ». *Skeletal Radiology* 32(10): 582-89.
- . 2005. « Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 25(3): 571-86.
- Koulouris, George, David A. Connell, Peter Brukner, et Michal Schneider-Kolsky. 2007. « Magnetic Resonance Imaging Parameters for Assessing Risk of Recurrent Hamstring Injuries in Elite Athletes ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(9): 1500-1506.

- Kulas, Anthony S. et al. 2018. « Bilateral Quadriceps and Hamstrings Muscle Volume Asymmetries in Healthy Individuals ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 36(3): 963-70.
- Kumazaki, T., Y. Ehara, et T. Sakai. 2012. « Anatomy and Physiology of Hamstring Injury ». *International Journal of Sports Medicine* 33(12): 950-54.
- Le Troter, Arnaud et al. 2016. « Volume Measurements of Individual Muscles in Human Quadriceps Femoris Using Atlas-Based Segmentation Approaches ». *Magma (New York, N.Y.)* 29(2): 245-57.
- Lemes, Italo Ribeiro et al. 2021. « Do Exercise-Based Prevention Programmes Reduce Non-Contact Musculoskeletal Injuries in Football (Soccer)? A Systematic Review and Meta-Analysis with 13 355 Athletes and More than 1 Million Exposure Hours ». *British Journal of Sports Medicine* 55(20): 1170-78.
- Linklater, James M. et al. 2010. « Hamstring Injuries: Anatomy, Imaging, and Intervention ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 14(2): 131-61.
- Lins, Carolina Freitas, Carlos Ernesto Garrido Salmon, et Marcello Henrique Nogueira-Barbosa. 2021. « Applications of the Dixon Technique in the Evaluation of the Musculoskeletal System ». *Radiologia Brasileira* 54(1): 33-42.
- Liu, Jia, Kristi L. Lewton, Patrick M. Colletti, et Christopher M. Powers. 2021. « Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(11): 2346-53.
- Louis, Luck J. 2008. « Musculoskeletal Ultrasound Intervention: Principles and Advances ». *Radiologic Clinics of North America* 46(3): 515-33, vi.
- Macdonald, Ben et al. 2019. « Hamstring Rehabilitation in Elite Track and Field Athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in Clinical Practice ». *British Journal of Sports Medicine* 53(23): 1464-73.
- Mack, Christina D. et al. 2020. « Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018 ». *The American Journal of Sports Medicine* 48(9): 2287-94.
- Mackey, Abigail L., et Michael Kjaer. 2017. « The Breaking and Making of Healthy Adult Human Skeletal Muscle in Vivo ». *Skeletal Muscle* 7(1): 24.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Gustaaf Reurink, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Injury Is Not Associated with an Increased Hamstring Reinjury Rate within 12 Months after Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 52(19): 1261-66.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Rod Whiteley, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Involvement on MRI Has Limited Value for Predicting Time to Return to Play Following Acute Hamstring Injury ». *British Journal of Sports Medicine* 52(2): 83-88.

- Mallinson, Joanne E. et al. 2020. « Longitudinal Hypertrophic and Transcriptional Responses to High-Load Eccentric-Concentric vs Concentric Training in Males ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 30(11): 2101-15.
- Mandić, Mirko et al. 2020. « Automated Assessment of Regional Muscle Volume and Hypertrophy Using MRI ». *Scientific Reports* 10(1): 2239.
- McCormick, Matthew et al. 2014. « ITK: Enabling Reproducible Research and Open Science ». *Frontiers in Neuroinformatics* 8: 13.
- Mendez-Villanueva, Alberto et al. 2016. « MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players ». *PLoS One* 11(9): e0161356.
- Mendiguchia, Jurdan et al. 2017. « A Multifactorial, Criteria-Based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 49(7): 1482-92.
- Mense, Siegfried. 2003. « The Pathogenesis of Muscle Pain ». *Current Pain and Headache Reports* 7(6): 419-25.
- Millan, M. J. 1999. « The Induction of Pain: An Integrative Review ». *Progress in Neurobiology* 57(1): 1-164.
- Moher, D., B. Pham, M. L. Lawson, et T. P. Klassen. 2003. « The Inclusion of Reports of Randomised Trials Published in Languages Other than English in Systematic Reviews ». *Health Technology Assessment (Winchester, England)* 7(41): 1-90.
- Monti, Elena et al. 2020. « The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training ». *Frontiers in Physiology* 11: 946.
- Morin, Jean-Benoît et al. 2015. « Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production ». *Frontiers in Physiology* 6: 404.
- Morse, Christopher I., Hans Degens, et David A. Jones. 2007. « The Validity of Estimating Quadriceps Volume from Single MRI Cross-Sections in Young Men ». *European Journal of Applied Physiology* 100(3): 267-74.
- Mühlenfeld, Nils et al. 2021. « Assessment of Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Football Players after Hamstring Injuries ». *European Journal of Sport Science*: 1-9.
- Nescolarde, L. et al. 2015. « Effects of Muscle Injury Severity on Localized Bioimpedance Measurements ». *Physiological Measurement* 36(1): 27-42.
- Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. 2019. « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI) ». *Journal de Traumatologie du Sport*.

- Nguyen, Hoai-Thu et al. 2021. « Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(4): 869-81.
- Nordez, Antoine et al. 2009. « Comparison of Methods to Assess Quadriceps Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 30(5): 1116-23.
- Nuell, Sergi et al. 2019a. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PLoS One* 14(11): e0224862.
- . 2019b. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PLoS One* 14(11): e0224862.
- Opar, David A. et al. 2015. « The Effect of Previous Hamstring Strain Injuries on the Change in Eccentric Hamstring Strength during Preseason Training in Elite Australian Footballers ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(2): 377-84.
- Orchard, J., et H. Seward. 2002. « Epidemiology of Injuries in the Australian Football League, Seasons 1997-2000 ». *British Journal of Sports Medicine* 36(1): 39-44.
- O'Sullivan, Lucy, Jamie Preszler, et Miho Tanaka. 2022. « Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 17(6): 1184-93.
- Panisset, Maya G. et al. 2020. « Factors Influencing Thigh Muscle Volume Change with Cycling Exercises in Acute Spinal Cord Injury - a Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial ». *The Journal of Spinal Cord Medicine*: 1-12.
- Patel, A. et al. 2015. « British Athletics Muscle Injury Classification: A Reliability Study for a New Grading System ». *Clinical Radiology* 70(12): 1414-20.
- Paton, Bruce M. et al. 2023. « London International Consensus and Delphi Study on Hamstring Injuries Part 1: Classification ». *British Journal of Sports Medicine*: bjsports-2021-105371.
- Peetrons, P. 2002a. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- . 2002b. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- Pieters, Dries, Evi Wezenbeek, Joke Schuermans, et Erik Witvrouw. 2021. « Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It Is Time to Consider Natural Healing ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(10): 2067-77.
- Pollock, Noel et al. 2016a. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2016b. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes:

- Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2021. « A 4-Year Study of Hamstring Injury Outcomes in Elite Track and Field Using the British Athletics Rehabilitation Approach ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Pollock, Noel, Steven L. J. James, Justin C. Lee, et Robin Chakraverty. 2014a. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- . 2014b. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- Pomeranz, S. J., et R. S. Heidt. 1993. « MR Imaging in the Prognostication of Hamstring Injury. Work in Progress ». *Radiology* 189(3): 897-900.
- Pons, Christelle et al. 2018. « Quantifying Skeletal Muscle Volume and Shape in Humans Using MRI: A Systematic Review of Validity and Reliability ». *PloS One* 13(11): e0207847.
- Rees, Huw et al. 2021. « The Burden of Injury in Field Hockey: A Secondary Analysis of Prospective Cohort Data ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 31(4): 884-93.
- Rettig, Arthur C., Susan Meyer, et Arup K. Bhadra. 2013a. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- . 2013b. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- Reurink, G., R. Whiteley, et J. L. Tol. 2015. « Hamstring Injuries and Predicting Return to Play: “Bye-Bye MRI?” ». *British Journal of Sports Medicine* 49(18): 1162-63.
- Reurink, Gustaaf et al. 2014. « MRI Observations at Return to Play of Clinically Recovered Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1370-76.
- Reurink, Gustaaf, Elisabeth G. Brilman, et al. 2015. « Magnetic Resonance Imaging in Acute Hamstring Injury: Can We Provide a Return to Play Prognosis? ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45(1): 133-46.
- Reurink, Gustaaf, Emad Almusa, et al. 2015. « No Association between Fibrosis on Magnetic Resonance Imaging at Return to Play and Hamstring Reinjury Risk ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(5): 1228-34.
- Rubin, David A. 2012. « Imaging Diagnosis and Prognostication of Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 199(3): 525-33.

- Rush, Justin L., Grant E. Norte, et Adam S. Lepley. 2020. « Limb Differences in Hamstring Muscle Function and Morphology after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 45: 168-75.
- Safar Cherati, Afsaneh et al. 2016. « The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and Its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(3): e35289.
- Schache, Anthony G. et al. 2012. « Mechanics of the Human Hamstring Muscles during Sprinting ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(4): 647-58.
- Schneider-Kolsky, Michal E., Jan Lucas Hoving, Price Warren, et David A. Connell. 2006. « A Comparison between Clinical Assessment and Magnetic Resonance Imaging of Acute Hamstring Injuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(6): 1008-15.
- Sciascia, Aaron, Jacob Waldecker, et Cale Jacobs. 2020. « Pain Catastrophizing in College Athletes ». *Journal of Sport Rehabilitation* 29(2): 168-73.
- Shield, Anthony J., et Matthew N. Bourne. 2018. « Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 48(3): 513-24.
- Silder, Amy et al. 2013. « Clinical and Morphological Changes Following 2 Rehabilitation Programs for Acute Hamstring Strain Injuries: A Randomized Clinical Trial ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 43(5): 284-99.
- Slavotinek, John P., Geoffrey M. Verrall, et Gerald T. Fon. 2002. « Hamstring Injury in Athletes: Using MR Imaging Measurements to Compare Extent of Muscle Injury with Amount of Time Lost from Competition ». *AJR. American journal of roentgenology* 179(6): 1621-28.
- Söderman, K., H. Alfredson, T. Pietilä, et S. Werner. 2001. « Risk Factors for Leg Injuries in Female Soccer Players: A Prospective Investigation during One out-Door Season ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 9(5): 313-21.
- Souza, Jaqueline de, et Carmem Gottfried. 2013. « Muscle Injury: Review of Experimental Models ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 23(6): 1253-60.
- Speer, K. P., J. Lohnes, et W. E. Garrett. 1993. « Radiographic Imaging of Muscle Strain Injury ». *The American Journal of Sports Medicine* 21(1): 89-95; discussion 96.
- Sprague, Andrew L. et al. 2018. « Modifiable Risk Factors for Patellar Tendinopathy in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 52(24): 1575-85.
- Stępień, Karolina et al. 2019. « Anatomy of Proximal Attachment, Course, and Innervation of Hamstring Muscles: A Pictorial Essay ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 27(3): 673-84.

- Tate, Christine Marie, Glenn N. Williams, Peter J. Barrance, et Thomas S. Buchanan. 2006. « Lower Extremity Muscle Morphology in Young Athletes: An MRI-Based Analysis ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(1): 122-28.
- Timmins, Ryan G. et al. 2016. « Short Biceps Femoris Fascicles and Eccentric Knee Flexor Weakness Increase the Risk of Hamstring Injury in Elite Football (Soccer): A Prospective Cohort Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(24): 1524-35.
- Torğutalp, Şerife Şeyma et al. 2021. « Volume and T2 Relaxation Time Measurements of Quadriceps Femoris and Hamstring Muscles Are Reliable and Reproducible ». *Turkish Journal of Medical Sciences* 51(4): 2007-14.
- Trappe, T. A., D. M. Lindquist, et J. A. Carrithers. 2001a. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- . 2001b. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- Verrall, G. M. et al. 2001. « Clinical Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury: A Prospective Study with Correlation of Injury by Magnetic Resonance Imaging ». *British Journal of Sports Medicine* 35(6): 435-39; discussion 440.
- Verrall, G. M., Y. Kalairajah, J. P. Slavotinek, et A. J. Spriggins. 2006. « Assessment of Player Performance Following Return to Sport after Hamstring Muscle Strain Injury ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 9(1-2): 87-90.
- Verrall, Geoffrey M. et al. 2006. « Assessment of Physical Examination and Magnetic Resonance Imaging Findings of Hamstring Injury as Predictors for Recurrent Injury ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 36(4): 215-24.
- Verrall, Geoffrey M., John P. Slavotinek, Peter G. Barnes, et Gerald T. Fon. 2003. « Diagnostic and Prognostic Value of Clinical Findings in 83 Athletes with Posterior Thigh Injury: Comparison of Clinical Findings with Magnetic Resonance Imaging Documentation of Hamstring Muscle Strain ». *The American Journal of Sports Medicine* 31(6): 969-73.
- Vivodtzev, Isabelle et al. 2018. « Quadriceps Muscle Fat Infiltration Is Associated with Cardiometabolic Risk in COPD ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 38(5): 788-97.
- Walsh, Meghan et al. 2012. « Lower Extremity Muscle Activation and Knee Flexion during a Jump-Landing Task ». *Journal of Athletic Training* 47(4): 406-13.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2015. « MRI Does Not Add Value over and above Patient History and Clinical Examination in Predicting Time to Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Cohort of 180 Male Athletes ». *British Journal of Sports Medicine* 49(24): 1579-87.

- . 2016. « Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 44(8): 2112-21.
- Wangenstein, Arnlaug, Johannes L. Tol, et al. 2017. « Intra- and Interrater Reliability of Three Different MRI Grading and Classification Systems after Acute Hamstring Injuries ». *European Journal of Radiology* 89: 182-90.
- Wangenstein, Arnlaug, Roald Bahr, et al. 2017. « MRI Appearance Does Not Change in the First 7 Days after Acute Hamstring Injury-a Prospective Study ». *British Journal of Sports Medicine* 51(14): 1087-92.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2018. « New MRI Muscle Classification Systems and Associations with Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Study ». *European Radiology* 28(8): 3532-41.
- Weber, Kenneth A. et al. 2019. « Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury ». *Scientific Reports* 9(1): 7973.
- Williams, Sean, Grant Trewartha, Simon Kemp, et Keith Stokes. 2013. « A Meta-Analysis of Injuries in Senior Men's Professional Rugby Union ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 43(10): 1043-55.
- Williamson, Amelia, et Barbara Hoggart. 2005. « Pain: A Review of Three Commonly Used Pain Rating Scales ». *Journal of Clinical Nursing* 14(7): 798-804.
- Woods, C. et al. 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.
- Wu, Y. F. et al. 2021. « [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging] ». *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 53(5): 843-49.
- Yamauchi, Koun, Chisato Kato, et Takayuki Kato. 2019. « Characteristics of Individual Thigh Muscles Including Cross-Sectional Area and Adipose Tissue Content Measured by Magnetic Resonance Imaging in Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study ». *Rheumatology International* 39(4): 679-87.
- Yang, Zepa et al. 2023. « Deep Learning-Based Pectoralis Muscle Volume Segmentation Method from Chest Computed Tomography Image Using Sagittal Range Detection and Axial Slice-Based Segmentation ». *PloS One* 18(9): e0290950.

Figures et Tableaux

Figure

Figure 1



Figure 1 : Exemple de récurrence de blessure des ischio-jambiers. Deux IRM réalisées à 9 mois d'écart, chez le même patient, lors de la blessure initiale (A, E), et lors de la récurrence (B, C, D, F), en séquences T2FatSat en coupe axiale (A, B, C), en séquence T1 en coupe axiale (D) et en séquences T2FatSat en coupe coronale (E, F). Les deux lésions concernent la jonction myo-tendineuse du chef long du muscle biceps fémoral, avec un œdème musculaire sur les séquences T2 FatSat, et une atteinte myo-tendineuse, avec à la fois un œdème sur les séquences T2 (C) et une asymétrie sur la séquence T1(D) où l'hyposignal normal du tendon est moins visible du côté droit (gauche de l'image, côté atteint) que du côté droit (droite de l'image, côté sain pour comme référence). L'atteinte est plus étendue lors de la récurrence, à la fois dans le plan axial (différence entre les images A et B/C), et en hauteur (différence entre les images E et F) le long de la jonction myo-tendineuse.

Tableau 1.

	Tous les patients	Patients avec récurrence	Patients sans récurrence	p-value
Nombres	41	15	26	
Caractéristiques cliniques				
Sexe (nombre de femmes) (n (%))	3 (7,3)	0 (0)	3 (11,5)	0,017*
Age (années) (moyenne (ET))	27,5 (8,1)	23,6 (5,3)	29,8 (8,6)	0,007*
Age (années) (Min-Max)	14-47	18-33	14-47	
Taille (cm) (moyenne (ET))	180,0 (7,9)	183,0 (8,2)	178,2 (7,3)	0,52
Poids (kg) (moyenne (ET))	77,1 (10)	76,0 (10,5)	77,7 (2,5)	0,63
IMC (kg.m ⁻²) (moyenne (ET))	23,7 (2,4)	22,5 (1,7)	24,4 (2,5)	0,007*
Délai entre première lésion et rappel (jours) (moyenne (ET))	803(437)	939 (476)	751 (420)	0,29
Délai entre première lésion et rappel (jours) (Min-Max)	154-1442	224-1427	154-1442	
Délai entre première lésion et récurrence (jours) (moyenne (ET))	NC	245 (189)	NC	
Délai entre première lésion et récurrence (jours) (Min-Max)	NC	59-510	NC	
Sports (n (%))				0,09
Football	14 (34,1)	6 (40,0)	8 (30,8)	
Athlétisme	11 (26,8)	7 (46,7)	4 (15,4)	
Trail	3 (7,3)	0 (0)	3 (11,5)	
Basketball	5 (12,2)	1 (6,7)	4 (15,4)	
Autres	8 (19,5)	1 (6,7)	7 (26,9)	
Mécanisme clinique de la blessure (n (%))				0,39
Course	28 (68,3)	12 (80,0)	16 (61,5)	
Etirement	4 (9,8)	0 (0)	4 (15,4)	
Saut	4 (9,8)	1 (6,7)	3 (11,5)	
Autres	5 (12,2)	2 (13,3)	3 (11,5)	
Niveau sportif (n (%))				0,18
Professionnel	7 (17)	4 (26,7)	3 (11,5)	
Semi-professionnel/national	10 (24)	5 (33,3)	5 (19,2)	
Amateur	24 (59)	6 (40,0)	18 (69,2)	
Douleur et fatigue				
Douleur à H0 (moyenne (ET))	6,0 (2,3)	5,0 (1,9)	6,5 (2,6)	0,03*
Douleur à H0 (Min-Max)				
Douleur à H24 (moyenne (ET))	5,3 (2,3)	4,7 (2,2)	5,7 (2,3)	0,17
Douleur à H24 (Min-Max)	0-10	0-8	01-10	
Niveau de fatigue (moyenne (ET))	3,6 (2,7)	4,3 (2,4)	3,2 (2,8)	0,15
Niveau de fatigue (Min-Max)	0-7	0-7	0-7	
Caractéristiques IRM				0,83

<i>Nombre de muscle concernés (n (%))</i>				
<i>Seulement un muscle</i>	28 (80,5)	12 (85,7)	16 (72,7)	
<i>Plusieurs muscles</i>	8 (19,5)	2 (14,3)	6 (27,3)	
<i>Grade de Peetrans (n (%))</i>				0,78
<i>Grade 0</i>	5 (12,2)	1 (6,7)	4 (15,4)	
<i>Grade 1</i>	7 (17,1)	3 (20,0)	4 (15,4)	
<i>Grade 2</i>	25(61,0)	10 (66,7)	15 (57,7)	
<i>Grade 3</i>	4 (9,8)	1 (6,7)	3 (11,5)	
<i>Muscle concerné en lésion principale (n (%))</i>				0,33
<i>BF</i>	27 (75)	12 (85,7)	15 (68,2)	
<i>ST</i>	2 (6)	1 (7,1)	1 (4,5)	
<i>SM</i>	7 (19)	1 (7,1)	6 (27,3)	
<i>Localisation (n (%))</i>				0,06
<i>Tiers proximal</i>	2 (5,6)	2 (14,3)	0 (0)	
<i>Tiers central et proximal</i>	5 (13,9)	0 (0)	5 (22,7)	
<i>Tiers central</i>	16 (44,4)	7 (50,0)	9 (40,1)	
<i>Tiers central et distal</i>	2 (5,6)	0 (0)	2 (9,1)	
<i>Tiers distal</i>	6 (16,7)	4 (28,6)	2 (9,1)	
<i>Tous concernés</i>	5 (13,9)	1 (7,1)	4 (18,2)	
<i>Localisation tissulaire (n (%))</i>	1-10	2-8	1-10	0,40
<i>Jonction musculo-tendineuse</i>	30 (83,3)	13 (92,9)	17 (77,3)	
<i>Intratendineuse</i>	2 (5,6)	0 (0)	2 (9,1)	
<i>Musculaire seule</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	
<i>Jonction Musculo-Aponévrotique</i>	4 (11,1)	1 (7,1)	3 (13,6)	
<i>Volume lésionnel</i>				0,0002*
<i>(mL) (moyenne (ET))</i>	75,1 (124,6)	37,2 (50,9)	99,2 (150,7)	
<i>(mL) (range)</i>	0,3-671,2	2,8-198,0	0,3-671,2	

Tableau 1. Caractéristiques physiques, démographiques et remnographiques (IRM) de la population.

*données significatives avec $p < 0.05$. ET=Ecart-type. NC=Non Concerné

Tableau 2.

	<i>Tous les patients</i>	<i>Patients avec récurrence</i>	<i>Patients sans récurrence</i>	<i>p-value</i>
Nombres	38	12	26	
Reprise du sport				
<i>Durée arrêt du sport avant reprise (semaine) (moyenne (écart type))</i>	9,0 (7,3)	8,8 (7,4)	9,0 (7,3)	0,38
<i>Durée arrêt du sport avant reprise (Min-Max)</i>	0-32	0-24	0-32	
<i>Présence d'une douleur à la reprise sportive (n (%))</i>	6 (15,8)	2 (16,7)	4(15,4)	0,92
Modification de la pratique sportive				
<i>Arrêt ou changement de sport (n (%))</i>	3 (7,9)	1 (8,3)	2 (7,7)	0,95
<i>Modification de l'entraînement (n (%))</i>	32 (84,2)	10 (83,3)	22 (84,6)	0,92
<i>Appréhension (n (%))</i>	24 (66,7)	8 (66,6)	16 (61,5)	0,71

Tableau 2. Caractéristiques de la reprise du sport et de la modification de la pratique sportive après la première blessure.

3- Discussion

Nous avons donc montré qu'un volume lésionnel initial faible était le seul facteur de risque remnographique de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Cela peut sembler paradoxal, on pourrait s'attendre à ce qu'une lésion musculaire plus importante augmente le risque de récurrence. D'après nos résultats, il semblerait qu'un faible volume lésionnel serait faussement rassurant, et inciterait donc à autant de vigilance qu'une lésion plus étendue.

De plus, le sexe masculin, l'âge moins élevé, un faible IMC et la faible douleur initiale étaient significativement associés à un risque plus élevé de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers. Il est intéressant de noter que le risque de récurrence est très difficile à prévoir après une première lésion musculaire aux IJ. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, la gravité de blessure à l'IRM ne semble pas être liée à ce risque de récurrence. Ainsi, ni le volume plus important, ni le grade élevé, ni l'atteinte de plusieurs muscles, ni la présence d'une composante tissulaire ne semblaient liés à un risque de récurrence

plus élevé. On notait aussi que le nombre de récurrence était plus important en athlétisme qu'au football ou aux autres sports. Il était intéressant de noter que les sportifs professionnels semblaient plus à même de se blesser à nouveau que les semi-professionnels ou les amateurs. Ceci pourrait être en lien avec la nécessité pour des contraintes économiques de reprendre le sport au plus vite chez les professionnels, ou être en lien avec une charge sportive plus importante. De plus, notre travail a permis de souligner les conséquences d'une blessure des IJ, avec une appréhension très fréquente à la reprise sportive. L'arrêt ou le changement de sport était toutefois très rare dans les deux groupes et sans différence entre eux. La modification de l'entraînement était par contre très fréquente après une lésion musculaire aux ischio-jambiers.

En perspective, on peut dire que l'estimation de la récurrence reste un défi clinique. L'identification des facteurs de risque de récurrence reste toujours sujet à discussion, et il pourrait être intéressant de reproduire ce design sur un échantillon de patients plus important. L'appréhension au moment du retour au sport était fréquemment retrouvée dans notre étude, ce paramètre pourrait altérer les bonnes conditions de retour au sport en toute sérénité et justifier un travail exploratif supplémentaire. Il semble donc que la prévention et l'accompagnement du sportif soient très importantes après une blessure, avec pour objectif une reprise du sport, et si possible au même niveau que précédemment, en évitant le risque de récurrence.

G - Segmentation musculaire

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, avec le Dr Thomas Grenier, le Dr Magalie Viallon-Croisille et le Dr Rémi Grange.

1- Extraction des données IRM

Lors de l'acquisition de l'IRM en routine clinique et en recherche, les images sont stockées dans le PACS (Picture Archiving and Communication System), ce qui permet d'avoir un accès direct à ces images à tout moment après son acquisition. Il est ensuite nécessaire d'extraire les images souhaitées dans le format DICOM (Digital Imaging and COmmunications in Medicine), qui est la norme internationale pour la transmission, le stockage, l'extraction, l'impression, le traitement et l'affichage d'informations d'imagerie médicale. La séquence utilisée pour la délimitation doit être choisie au préalable en fonction des structures à délimiter. La séquence T1 Dixon utilisée pour l'acquisition 3D permet d'avoir 4 contrastes différents (in-phase, out-phase, fat, et water). Nous avons choisi d'utiliser la séquence Water, permettant d'avoir un excellent contraste entre les structures tendino-aponévrotiques et la graisse en hyposignal, et le muscle en signal intermédiaire (Lins, Salmon, et Nogueira-Barbosa 2021). La séquence Water est ainsi exportée du PACS en format DICOM vers le logiciel choisi pour réaliser la segmentation.

2- Logiciels et outils à disposition

La méthodologie de segmentation musculaire est à adapter à chaque groupe musculaire, à chaque type de patient (âge, pathologie) et en fonction des habitudes de celui qui délimate. Dans la très grande majorité des cas, les zones difficiles et sujettes à discussion sont situées en périphérie des muscles et à leurs insertions proximales et distales (jonctions myo-tendineuses et myo-aponévrotiques). La délimitation peut être faite simplement par la mise en place de points de contrôles permettant de délimiter le muscle, ou alors par méthode de « comblement » à partir de cercles de différentes tailles. Plusieurs logiciels sont disponibles et appropriés pour la segmentation musculaire. Parmi ceux disponibles, nous avons utilisé 3D Slicer® et Horos®. 3D Slicer® (<https://slicer.org>) (Figure 13) est un logiciel open-source multi-OS, développé et basé sur les bibliothèques ITK/VTK de Kitware pour la visualisation et le traitement

d'images et de maillages médicaux, biomédicaux et autres en 3D, ainsi que pour la planification et la navigation dans des procédures guidées par l'image.

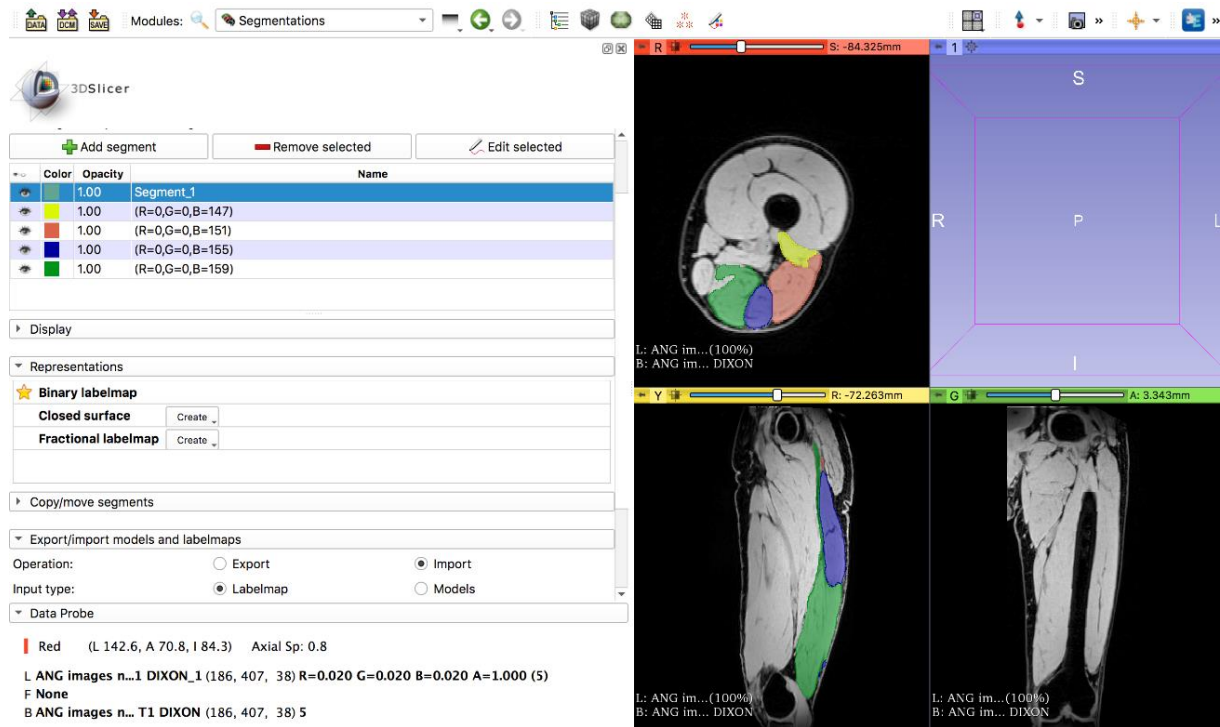


Figure 13. Segmentation des ischio-jambiers sur Logiciel 3D Slicer®.

Ici, un exemple de présentation du Logiciel 3D Slicer® lors d'une segmentation des ischio-jambiers. La technique utilisée ici est le remplissage progressif du muscle à délimiter, méthode « de comblement ». Nous avons à disposition des ronds de tailles différentes, permettant à la fois un remplissage rapide pour les zones centrales, faciles à délimiter, et permettant de ne pas oublier certains pixels ; mais aussi des ronds plus petits, notamment pour les zones limitrophes, afin de segmenter et précisément, au pixel près, les périphéries du muscle à délimiter.

Horos® quant à lui est une visionneuse d'images médicales open-source, fonctionnel que sur OsiriX (<https://www.osirix-viewer.com>). (Figure 14).

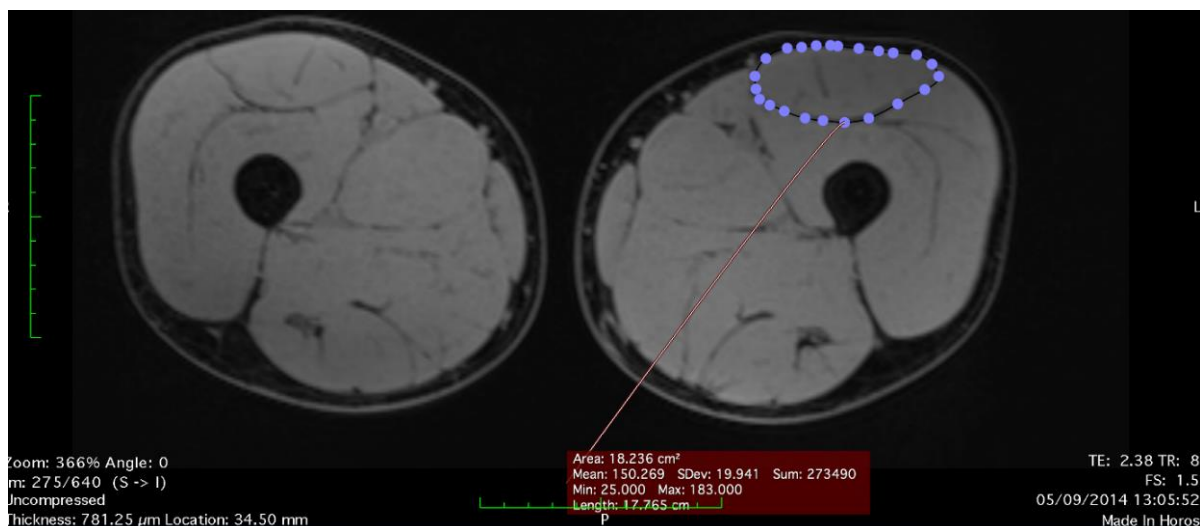


Figure 14. Segmentation du chef droit antérieur du quadriceps fémoral sur le Logiciel Horos®.

Ici, la segmentation a été réalisée en positionnant des points de contrôle autour du muscle à segmenter, permettant de tracer un contour basé sur une spline. Une fois les premiers points mis en place, il peut être nécessaire de rajouter toutefois quelques points supplémentaires ou d'en déplacer certains le long de la délimitation pour que le contour soit optimal.

La délimitation peut être faite soit à la souris, soit à l'aide d'une tablette graphique. Celle-ci, grâce à l'association d'un écran interactif et d'un stylet, permet une approche manuelle plus fine. Nous avons utilisé la tablette graphique Wacom® Intuos (Figure 15). Cette méthode est assez ergonomique, ce qui est important car les délimitations sont longues et fastidieuses à réaliser. De plus, une alternance entre cette méthode et la méthode « classique » à la souris permet de varier les méthodes de délimitation, et donc améliore la qualité de travail, et permet des séances de délimitations plus longues et plus efficaces.



Figure 15. Exemple de tablette graphique Wacom® INTUOS S utilisée dans notre étude.

L'utilisation de l'écran interactif (au-dessus), connecté à l'ordinateur, et du stilet (en dessous), permet une approche manuelle fine. Il s'agit de la même méthode utilisée actuellement par les dessinateurs professionnels.

3- Particularités des délimitations musculaires : difficultés et moyens de s'en affranchir

Dans notre travail, nous avons été amenés à segmenter les muscles de la cuisse. Les deux compartiments principaux de la cuisse sont le quadriceps femoris (QF), composé du rectus femoris (RF) aussi appelé droit antérieur, du vastus lateralis (VL), du vastus intermedius (VI) et du vastus medialis (VM) ; et l'ischio-jambier (IJ) composé du semimembranosus (SM), du semitendinosus (ST), du chef long du biceps femoris (BFCL ou BL) et du court chef du biceps femoris (BFCC ou BC). Ces muscles sont en général assez volumineux, a fortiori dans notre population de sportifs (trailers pour la cohorte MUST, sportifs d'origine variée pour la cohorte HAMMER), et donc avec des muscles hypertrophiques. L'individualisation du muscle n'est donc pas un problème dans cette loge musculaire. La faible composante grasseuse de ces muscles chez ces sportifs rend par contre difficile l'individualisation fiable des limites de ces muscles en périphérie de ceux-ci, notamment quand il y a un autre muscle au

contact, avec pas ou très peu de graisse entre les aponévroses des muscles, comme c'est le cas dans la loge du quadriceps et de celle des ischio-jambiers.

Afin de limiter les risques d'erreurs, il faut connaître les risques pour s'en prémunir. Tout d'abord, une bonne connaissance anatomique à la fois musculaire, mais aussi de l'ensemble des éléments à proximité, est indispensable pour ne pas confondre les différentes structures anatomiques. De plus, il est très important de pouvoir avoir, comme en radiologie clinique, une approche tridimensionnelle des structures, à la fois par l'analyse simultanée des trois plans de l'espace lors des délimitations (affichage multiplanaire), mais aussi une vision « continue » de chaque chef musculaire par défilement des images, afin d'appréhender au mieux les modifications de morphologie des structures aponévrotiques. Par exemple, sur le muscle SM (au sein de la loge des IJ), il existe une portion proximale très longtemps membraneuse (d'où son nom), et l'apparition du muscle va se faire de manière très tardive mais assez brutale, imposant d'avoir cette approche à la fois tridimensionnelle au moment de la délimitation, et après avoir bien appréhendé le muscle dans sa globalité (Figure 16).

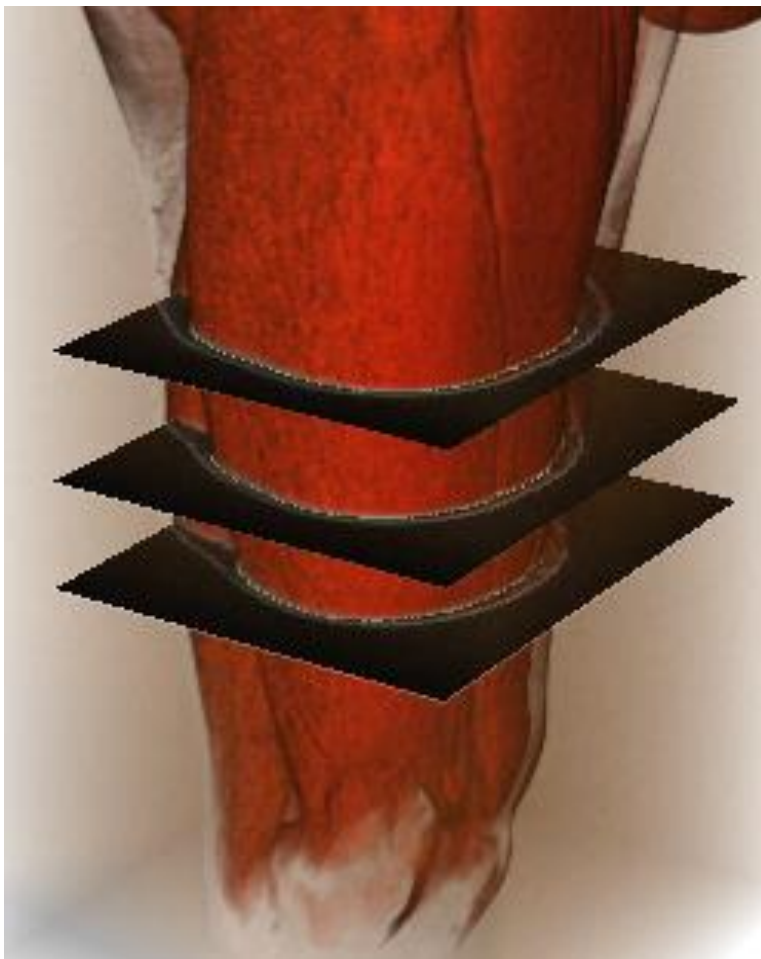


Figure 16. Exemple de représentation tridimensionnelle d'un quadriceps, à partir de segmentations complètes de chaque chef.

Cette approche tridimensionnelle permet de bien appréhender le muscle dans sa globalité. Les coupes en noires correspondent au des coupes axiales natives, si un doute persistait à certains niveaux.

Cet affichage peut être complété par une vision « mixte », tridimensionnelle et planaire, avec par exemple la coupe 3D affichée à gauche et les coupes axiales choisies affichées à droite, avec les délimitations associées (Figure 17).

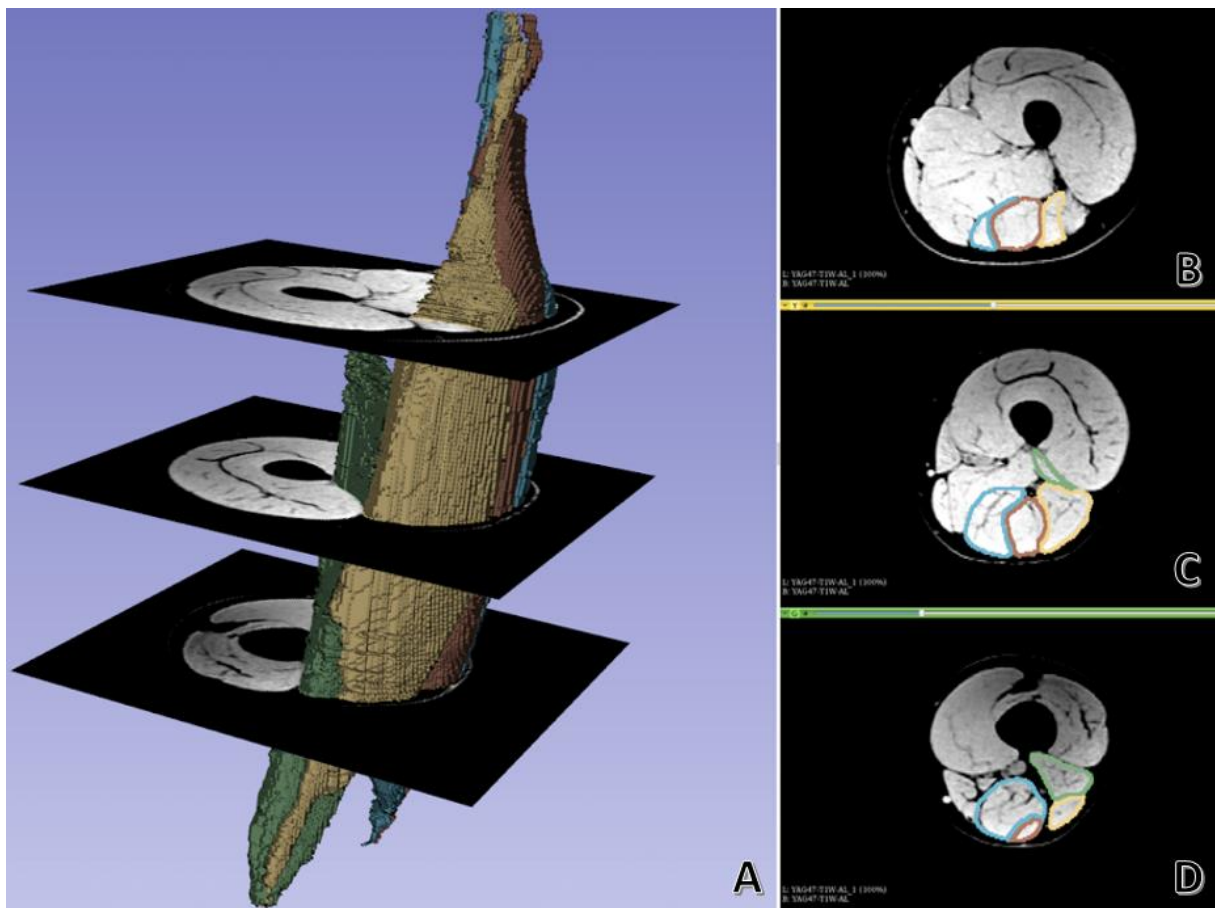


Figure 17. Segmentation complète de chaque chef des ischio-jambiers sur l'ensemble du volume.

Exemple de représentation en 3 dimensions (A) et en axial, sur 3 niveaux de coupe différents (de haut en bas : B, C, D), avec simplement les contours des délimitations représentés, sur le quadriceps gauche. Le Semi-Membraneux (SM) est représenté en bleu, le Semi-Tendineux en rouge (ST), le chef long du Biceps Fémoral (BFCL) en jaune et le chef court du Biceps Fémoral (BFCC) en vert.

Par ailleurs, la délimitation peut ainsi être réalisée au pixel près, sur chaque coupe du volume à délimiter. Il est important, lors des délimitations, de zoomer au maximum pour affiner les délimitations. Une technique consiste, afin de gagner du temps, à délimiter le muscle entièrement sur

la coupe, puis de réaliser une correction fine des pixels sur les contours, en ayant zoomé au maximum au préalable. Cette technique est souvent celle utilisée lors des segmentations « semi-supervisées » où le muscle a été segmenté de manière initialement non supervisée par un outil d'intelligence artificielle, puis l'expert vient réaliser les corrections souvent fines qu'il juge nécessaire, principalement des pixels en périphérie et en distalité du muscle (Figure 18).

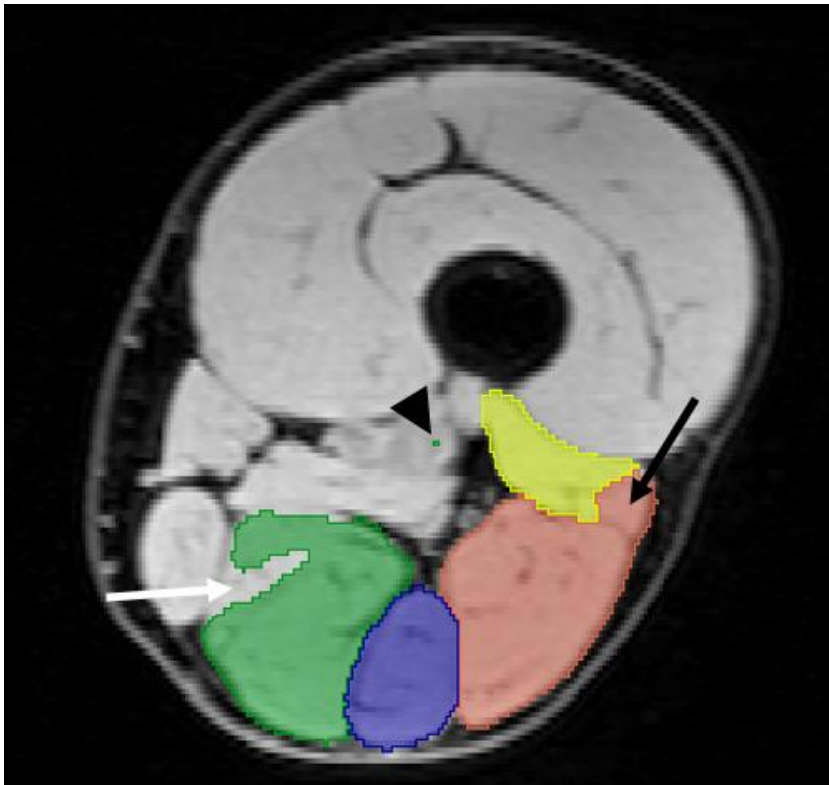


Figure 18. Exemple de représentation en coupe axiale d'une segmentation non supervisée des ischio-jambiers de la cuisse gauche.

Chaque chef est délimité de manière individuelle, en superposition avec l'IRM sous-jacente, avant correction manuelle experte. En vert est représenté le semi-membraneux (SM), en bleu le semi-tendineux (ST), en rouge le chef long du biceps fémoral (BFCL) et en jaune le chef court du biceps fémoral (BFCC). On peut ainsi noter des zones « sous-segmentées (flèche blanche), des zones « sur-segmentées » où la segmentation du BFCL déborde sur la segmentation du BFCC (flèche noire), et une zone qu'on peut qualifier d'« aberrante » où quelques pixels verts sont situés bien à distance du muscle SM.

Il est aussi important d'avoir une vision d'ensemble des images IRM avec les segmentations musculaires (Figure 19), permettant la vérification de la cohérence globale des segmentations entre elles et des éventuelles dernières corrections. Cet affichage permet de faire défiler les coupes selon

l'axe pour avoir une vision d'ensemble. Il peut être réalisé dans les autres plans (pas seulement axial, mais aussi coronal et sagittal, en fonction de la morphologie de la structure à délimiter).

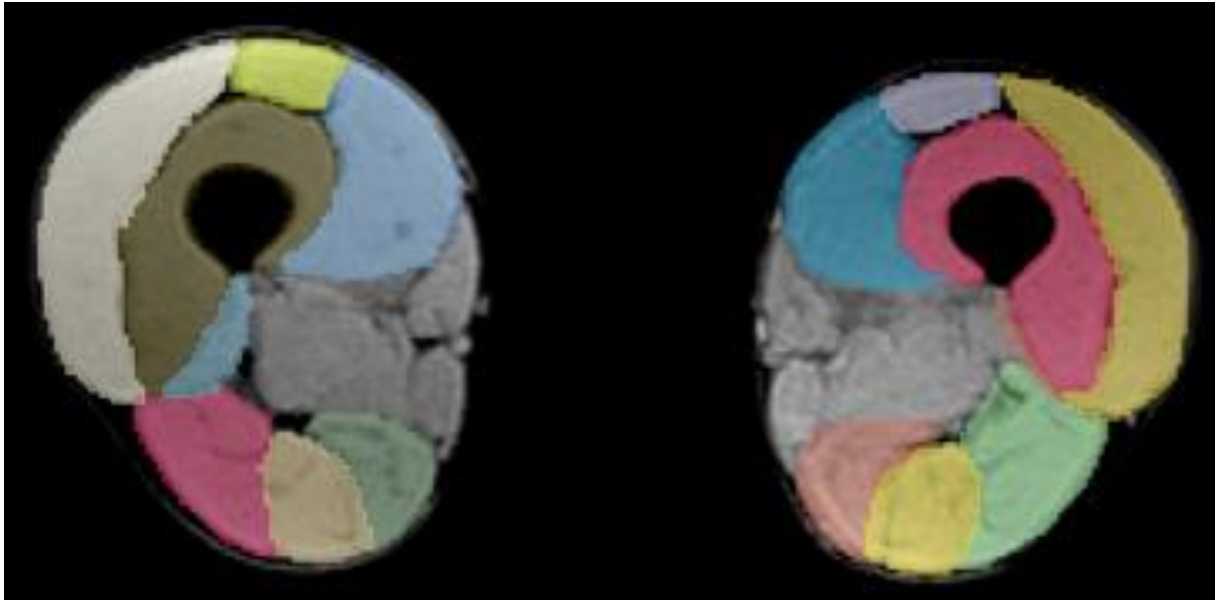


Figure 19. Délimitation de deux quadriceps et ischio-jambiers.

L'image représente en coupe axiale la segmentation complète des deux quadriceps et des deux ischio-jambiers, avec chaque chef délimité de manière individuelle, en superposition avec l'IRM sous-jacente. Il est aussi important d'avoir cette vision d'ensemble des images IRM avec les segmentations musculaires. Cela permet la vérification de la cohérence globale des segmentations entre elles. Cet affichage permet de faire défiler les coupes selon l'axe pour avoir une vision d'ensemble, et peut être adapté en fonction de la morphologie de la structure à délimiter.

De plus, l'extraction des délimitations (Figure 20), affichées seules sans les images de l'IRM, et donc directement sur fond noir, permet la correction de certains pixels incohérents parfois difficiles à discerner lorsque l'image IRM est superposée.

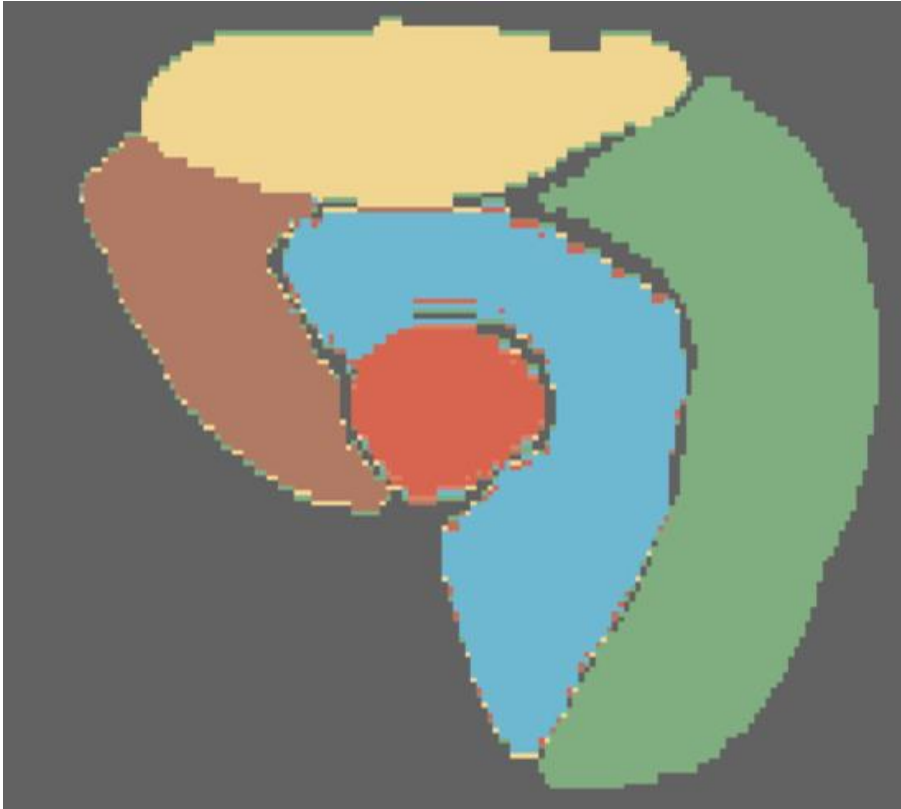


Figure 20. Exemple d'extraction de segmentation d'une coupe de quadriceps gauche.

Chaque chef est délimité de manière individuelle (droit antérieur en jaune, vaste intermédiaire en bleu, vaste médial en rouge et vaste latéral en vert) autour du fémur (rouge). Cet affichage seul sans les images de l'IRM en superposition, et donc directement sur fond noir, permet la correction de certains pixels incohérents parfois difficiles à discerner lorsque l'image IRM est superposée. On peut voir par exemple ici des pixels incohérents, avec notamment une bande de pixel rouge dans le vaste intermédiaire.

De plus, il ne faut pas négliger la pénibilité du travail de délimitation. L'aspect très fastidieux peut rendre le travail difficile et expose au risque d'erreurs. Il faut savoir fragmenter les séances de délimitation, et ne pas hésiter à alterner entre la méthode de délimitation au stylet et la méthode « classique » de délimitation à la souris, en alternant là aussi les méthodes de positionnement des points et les méthodes de comblement.

H - Etude de la variabilité des segmentations inter-observateur et de leur distribution spatiale

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, avec le Dr Thomas Grenier, le Dr Magalie Viallon-Croisille et le Dr Rémi Grange.

Afin de tester la fiabilité inter observateurs, nous avons réalisé des segmentations complètes sur 5 patients, sur le quadriceps droit, sur chaque coupe millimétrique et sur l'ensemble du volume de la séquence water du T1 Dixon acquis en 3D.

Afin de mieux appréhender les scores, nous allons donner un exemple d'un des résultats obtenu pour un patient : « DSC : 0.95 ; HD: 39.16mm ; AHD: 0.11mm ; VS: 0.02 ». Il est important de commencer par le DSC et le VS. Ici, le DSC est à 0.95, ce qui est un excellent score (proche de 1). Il en est de même pour le VS à 0.02, qui est proche de 0. La HD est à 39.16mm, mais la AHD est beaucoup plus faible à 0.11mm, ce qui signifie que des pixels s'éloignent de manière notable de l'autre délimitation, mais qu'ils sont très rares (moyenne très en dessous de la valeur maximale).

Au-delà des scores, il est important de comprendre où sont présentes les discordances entre les deux délimitations (comme ici entre les deux experts). Pour cela, il peut être utile de réaliser une superposition de l'image native axiale (reconstruction water du T1 Dixon), et de superposer les deux délimitations, en utilisant un code couleur. Ainsi, comme présenté sur la Figure 21, il existe 4 types de voxels représentées en fin de délimitation :

- Ceux sans couleur (simplement l'image IRM sous-jacente) n'ayant jamais été considérée dans la délimitation par les experts
- Ceux représentant les zones d'accord entre les deux experts (superposition entre les deux segmentations), représentés en vert
- Ceux représentant les zones de désaccord entre les deux experts. Ces zones de désaccord sont représentées en orange dans un sens (délimité par l'expert R mais pas S) et rouge (délimité par l'expert S mais pas R).

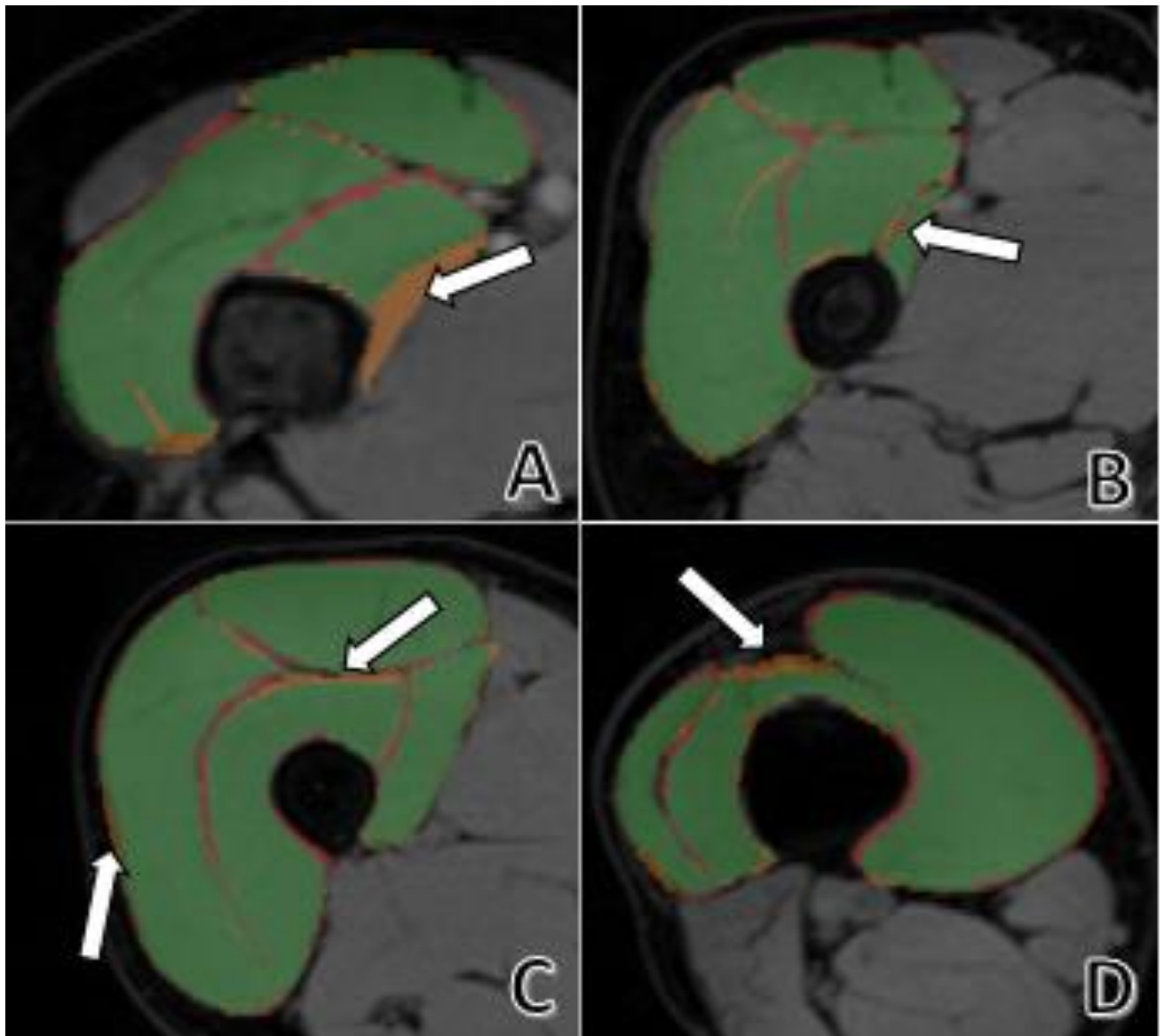


Figure 21. Zones de discordance inter-observateurs sur une segmentation du quadriceps chef par chef.

En vert sont représentées les zones de superposition entre les deux segmentations, en orange sont représentées les zones de discordances dans un sens (voxels délimités par R mais pas par S) et en rouge les discordances dans l'autre sens (voxels délimités par S mais pas par R). Sur l'image A, on observe une discordance assez marquée à la naissance du vaste interne. Sur l'image B, on observe une discrète discordance entre le vaste médial et le vaste interne. Sur l'image C, il existe des discordances modérées entre la périphérie du vaste latéral et la graisse sous cutanée (flèche de gauche) et entre le vaste intermédiaire et le droit antérieur (flèche de droite). Enfin, sur l'image D, l'apparition progressive du tendon quadricipital, à partir des chefs musculaires, est à l'origine d'un désaccord non négligeable entre les opérateurs.

Une fois les métriques calculées et les zones de discordance spatialement mises en évidence, il est intéressant de pouvoir faire le lien entre les deux pour permettre de mieux comprendre les potentielles erreurs de segmentations, de mieux analyser et comprendre les scores, d'améliorer les segmentations, et ceci que ce soient pour l'expert ou pour la segmentation non supervisée. Les scores doivent être au mieux analysés selon la hauteur de coupe du muscle, permettant un repérage de la variation des erreurs selon l'axe z. Dans la figure 22, nous avons numéroté les coupes de 0 (en proximale, première coupe réalisée, ne correspondant pas à la première coupe d'apparition du quadriceps) à la dernière coupe réalisée vers 700. Le droit fémoral est le premier à apparaître, en général vers la coupe 50, et le vaste médial le dernier à apparaître, en général entre 150 et 200. Ensuite, l'analyse peut se faire selon les coupes, afin de pouvoir localiser de manière plus précise. Il est ainsi intéressant d'analyser comment se comporte globalement la DSC sur l'ensemble des coupes et sur le quadriceps complet.

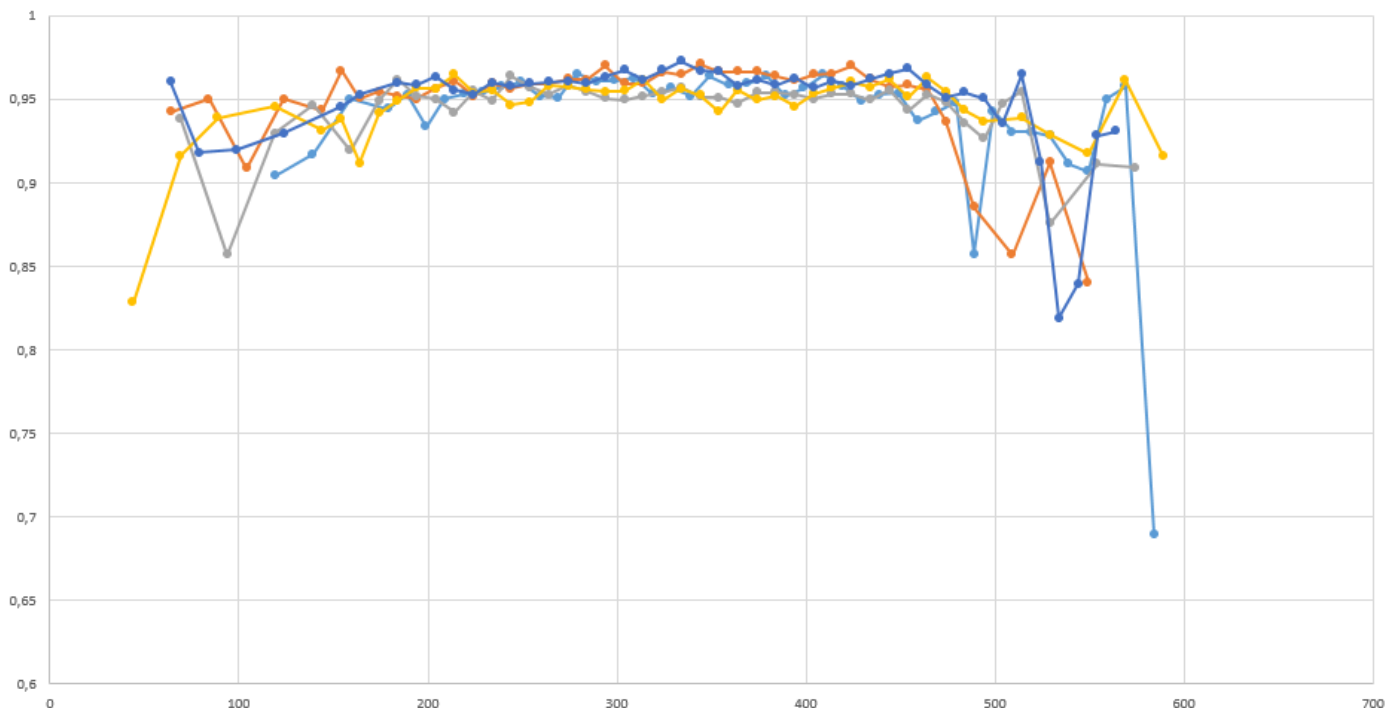


Figure 22. Représentation du DICE entre les segmentations des deux experts, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.

En ordonnée est représenté le DSC, ici numéroté de 0.6 à 1. En abscisse sont représentées les coupes IRM en axial, de haut en bas, numérotées de 0 à 700. Les 5 patients testés sont représentés chacun d'une couleur différente. Le DSC est calculé et représenté pour chaque coupe et pour chaque patient,

dans le cas où une délimitation a été réalisée pour une coupe donnée. A noter que les premières coupes apparaissent et disparaissent différemment en fonction des patients, à savoir respectivement entre 50 et 120 et entre 550 et 580 environ. Tout d'abord on note ici que le DSC est excellent pour tous les patients, et sans discontinuer, sur les deux tiers centraux du muscle, environ entre 200 et 450. Les parties proximales et surtout distales sont sujettes à des DSC beaucoup moins bons.

Il est ensuite intéressant d'analyser la VS et de faire les corrélations entre le DSC et la VS (Figure 23). Ces deux entités ne sont pas forcément superposables et une VS correcte n'est pas synonyme de bonne valeur de DSC.

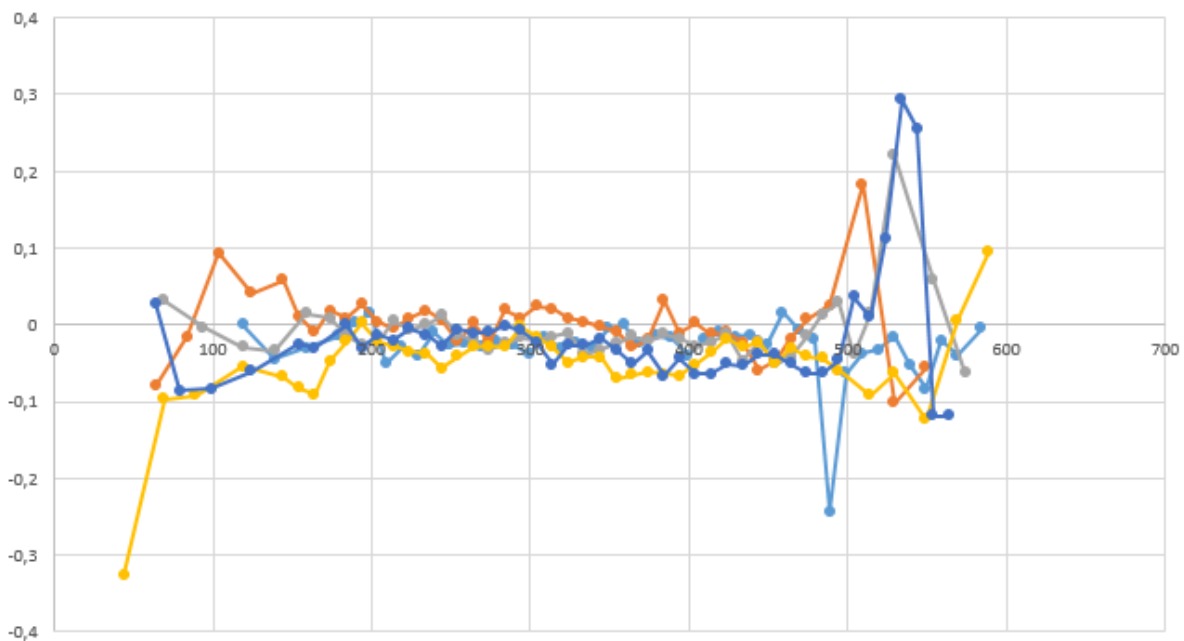


Figure 23. Représentation de la VS entre les deux experts, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.

En ordonnée la VS, ici représenté de -0.4 à 0.4. En abscisse sont représentées les coupes IRM en axial, de haut en bas, numérotés de 0 à 700. Les 5 patients testés sont représentés chacun d'une couleur différente. La VS est calculée et représentée pour chaque coupe et pour chaque patient, dans le cas où une délimitation a été réalisée pour une coupe donnée. On retrouve, comme pour le DSC, que la VS est excellente pour tous les patients, et sans discontinuer, sur les deux tiers centraux du muscle, là aussi environ entre 200 et 450. Les parties proximales et distales sont sujettes elles aussi, comme pour la DSC, à des variations. Il est important de noter que les variations sont réparties globalement de manière homogène de part et d'autre de la ligne des abscisses, signifiant qu'un expert n'a pas tendance à « sur-segmenter » par rapport à un autre.

Après avoir analysé la VS et le DSC de manière globale, il est utile d'analyser chaque chef musculaire de manière séparée (Figure 24). Ainsi, il va apparaître dans des régions, des zones avec des valeurs plus ou moins bonnes. Cela va nous permettre d'avoir une analyse globale de chaque chef musculaire.

Ainsi, nous pouvons, pour le muscle quadriceps, individualiser deux types d'erreurs :

- Une erreur « homogène », correspondant aux limites péri-musculaires (musculo-aponévrotique périphérique, zones inter-musculaires). Cette difficulté explique une erreur de fond, assez homogène entre les différents muscles et selon la hauteur du muscle
- Une erreur plus hétérogène, circonscrite aux extrémités proximales et distales, et correspondante aux zones de jonction tendino-musculaire. Celle-ci est beaucoup plus variable entre les pôles proximaux et distaux, et notamment en fonction des muscles. Ce type d'erreur est visible sur l'analyse du DSC et de la VS. L'analyse du HD selon chaque chef musculaire permet, au sein d'un même groupe musculaire comme le quadriceps, de détecter des disparités entre les différents chefs musculaires, en mettant en avant des pixels très discordants. Le AHD permet le même type de détection, mais de manière plus « lissée », car c'est la moyenne des distances qui est traitée et non le pixel maximum qui est seulement considéré comme avec la HD (figure 25).

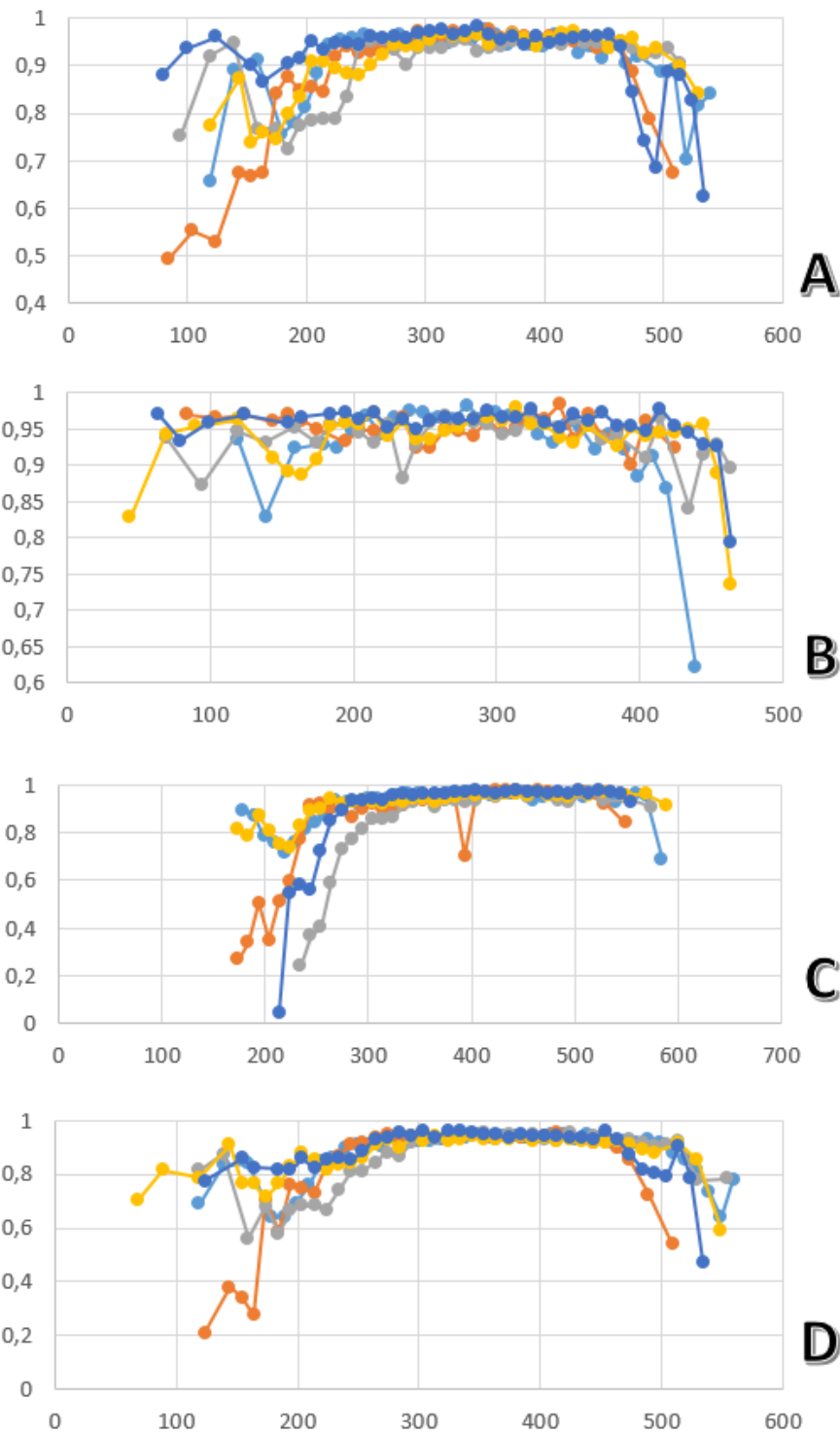


Figure 24. Représentation du DICE entre les deux experts, sur chaque chef musculaire, en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps.

A=Vastus Lateralis, B= Rectus Femoris, C=Vastus Medialis, D=Vastus Intermedius. En ordonnée la DSC, représentée différemment pour chaque chef musculaire. En abscisse sont représentées les coupes IRM en axial, de haut en bas, numérotées là aussi différemment en fonction des chefs. Les 5 patients testés sont représentés chacun d'une couleur différente. Le DSC est calculé et représenté pour chaque coupe et pour chaque patient, dans le cas où une délimitation a été réalisée pour une coupe donnée. Globalement, pour chaque chef, on retrouve que le DSC est excellent pour tous les patients, sans

discontinuer, sur les deux tiers centraux des muscles. L'analyse chef par chef de haut en bas permet de mettre en évidence des disparités entre les différents chefs musculaires. On peut noter que le Rectus Femoris(B) est relativement bon dès le début, traduisant que ses délimitations proximales portent peu à discussion, avec des DSC supérieures à 0.8. Par contre, il existe une altération dans la partie basse (zone d'insertion tendineuse), avec certains DSC proches de 0.6. Inversement, le Vastus Medialis (C) présente des discordances très importantes (certains DSC inférieurs à 0.4) dans sa partie supérieure, alors que la partie distale est relativement épargnée par les disparités. Le profil du Vastus Lateralis (A) et du Vastus Intermedius (D) sont relativement superposables, avec un profil très correct dans la partie centrale, mais avec des discordances distales et surtout proximales marquées.

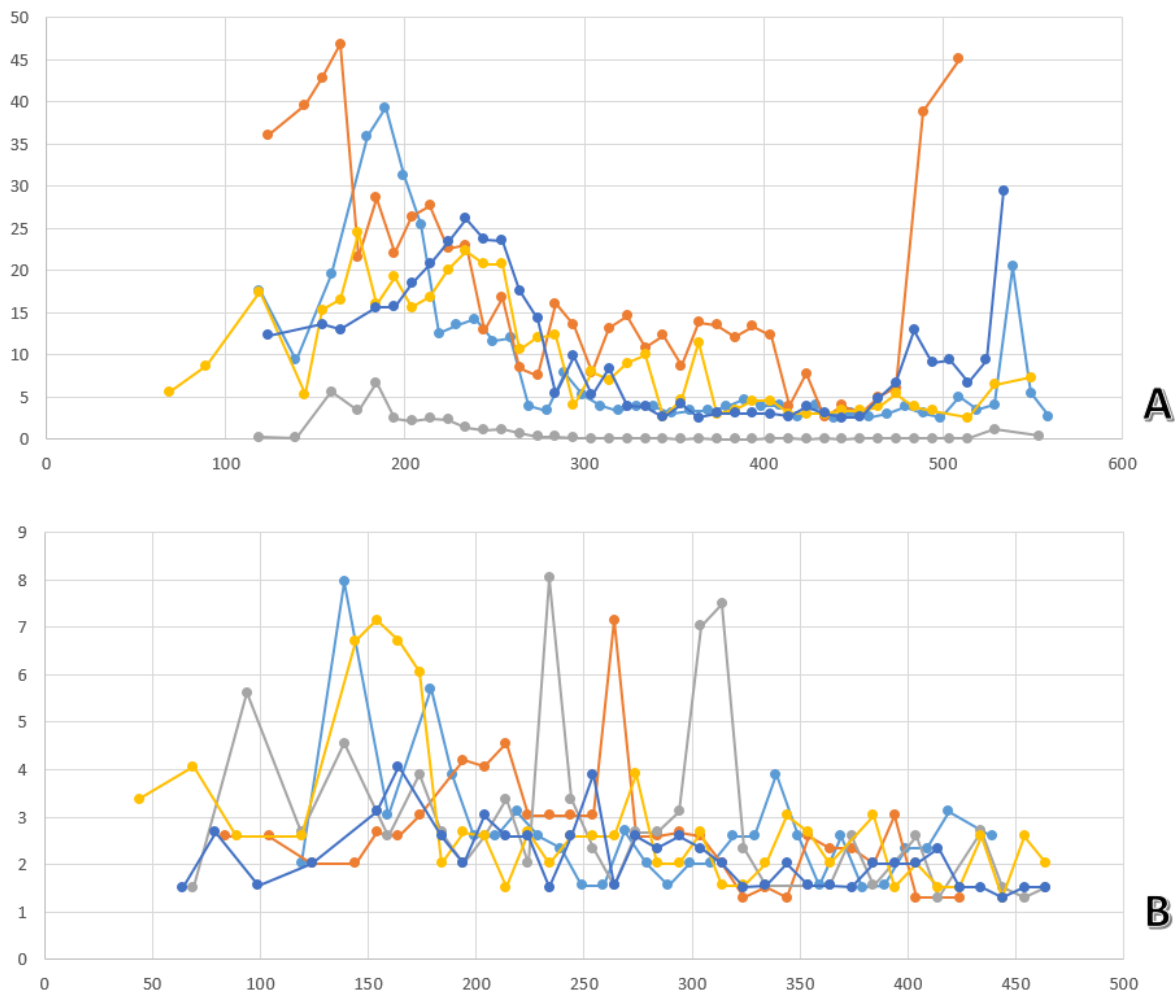


Figure 25. Représentation de la HD (Hausdorff Distance) entre les deux experts.

Ici sont représentés le Vastus Intermedius (A) et le Rectus Femoris (B), en fonction de la hauteur de coupe du quadriceps. En ordonnée est représentée la HD en mm, en abscisse les coupes IRM en axial, de haut en bas. Les 5 patients testés sont représentés chacun d'une couleur différente. La HD est calculée et représentée pour chaque coupe et pour chaque patient, dans le cas où une délimitation a été réalisée pour une coupe donnée. La HD permet ainsi de mettre en évidence si les disparités sont liées à une répartition hétérogène de nombreux pixels, ou s'il existe des disparités locales très marquées. Ainsi, on peut voir que les deux courbes présentent une échelle d'ordonnée différente, la HD max allant jusqu'à 45mm pour la courbe A et seulement 8 pour la courbe B, traduisant la meilleure cohérence pour le RF que le VI, ce dernier étant plus difficile à délimiter. De plus, pour le RF, la grande majorité des valeurs du HD est comprise en dessous des 4mm, ce qui est très bas. Les valeurs sont globalement homogènes pour le RF. Inversement, le VI présente un profil correct au centre, mais des discordances proximales assez prolongées (entre les coupes 100 à 300) pour 4 patients sur 5, et en distales de manière plus circonscrites (entre 450 et 550) et essentiellement pour seulement deux patients sur les cinq.

I - Signature morphologique et sélection des atlas

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, avec le Dr Thomas Grenier et le Dr Magalie Viallon-Croisille.

Un des problèmes de la méthode Multi-Atlas est la présence de morphologies différentes entre les différents sujets (Figure 26), qui va au-delà uniquement de la trophicité du muscle (Le Troter et al. 2016).

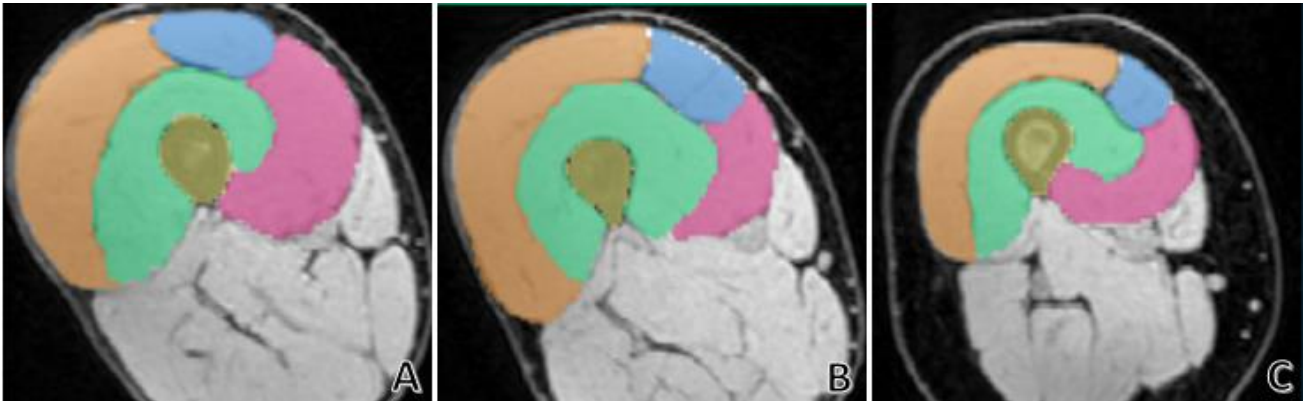


Figure 26. Représentation de 3 sujets de morphologie différente.

Des segmentations du fémur et de chaque chef du quadriceps droit ont été réalisées. Le sujet A se situe dans la moyenne des coordonnées morphologiques. A noter la trophicité importante du vaste interne et la position du droit antérieur, bien centré relativement à l'axe du fémur. La trophicité qui se situe dans la moyenne pour un traileur. Le sujet B présente une trophicité très importante du muscle quadriceps, avec un vaste latéral très développé, un vaste intermédiaire aussi très développé et bien réparti de manière héli-circonférentielle antérieure autour du fémur, et un droit antérieur situé très en dedans. Le sujet C présente une trophicité beaucoup moins importante et un chef droit antérieur très peu développé et situé très en dedans.

Ainsi, par exemple pour le quadriceps, il existe des différences entre les sujets féminins et masculins. Il existe des exemples anatomiques pour ces différences. Ainsi, la forme du bassin est différente entre les deux sexes, et l'angulation du fémur (celui-ci se dirige plus en dedans en direction de la distalité que pour les sujets masculins) (Liu et al. 2021) explique en partie le positionnement différent des chefs musculaires. Par ailleurs, l'hypertrophie musculaire induit des modifications morphologiques de positionnement des différents chefs par rapport au fémur, par exemple sur une même coupe axiale, le muscle droit fémoral a tendance à être plus externe quand le muscle est plus trophique ; inversement, avec l'âge et la fonte musculaire, celui-ci a tendance à être plus interne. Ces différences expliquent la difficulté des

méthodes Multi-Atlas à faire correspondre un sujet avec un atlas. Cela induit à la fois des erreurs, mais engendre aussi du temps machine. Il nous a donc paru intéressant de pouvoir trouver des critères simples pour pouvoir rapidement trouver un atlas similaire à un nouveau sujet, et ainsi directement utiliser l'atlas correspondant au mieux pour faire la segmentation non supervisée. Nous avons donc utilisé cette méthode sur la cohorte MUST (Nguyen et al. 2021), en utilisant la coupe du muscle située à 15cm au-dessus de la partie supérieure de la patella, sur des quadriceps droits. Nous avons ainsi, pour 41 sujets (sans utiliser les 7 patients de la cohorte MUST précédemment entièrement délimité), segmenté les 4 chefs musculaires du quadriceps ainsi que le fémur, sur cette même coupe. Nous avons utilisé le centre du fémur et le centre du muscle vaste intermédiaire (VI) comme référence, puis les centres des autres chefs musculaires, afin de pouvoir obtenir 3 caractéristiques morphologiques sur cette coupe centrale (Figure 27) : la surface de chaque chef musculaire, la distance entre le centre du fémur et chaque chef musculaire, mais aussi l'angle formé par la droite formée par le centre du fémur et le centre du VI, et celle formée par le centre du fémur et le centre de l'autre chef musculaire (nous n'avons ainsi pas de valeur d'angle pour le VI). 11 valeurs de caractéristiques étaient ainsi disponibles. L'intérêt d'inclure l'angle permet de s'affranchir du biais de rotation, dépendant notamment de la position du patient dans l'IRM, et l'éventuelle rotation de la jambe et du pied en fonction de l'installation, ce que nous avons confirmé en réalisant une acquisition en position neutre et en rotation interne.

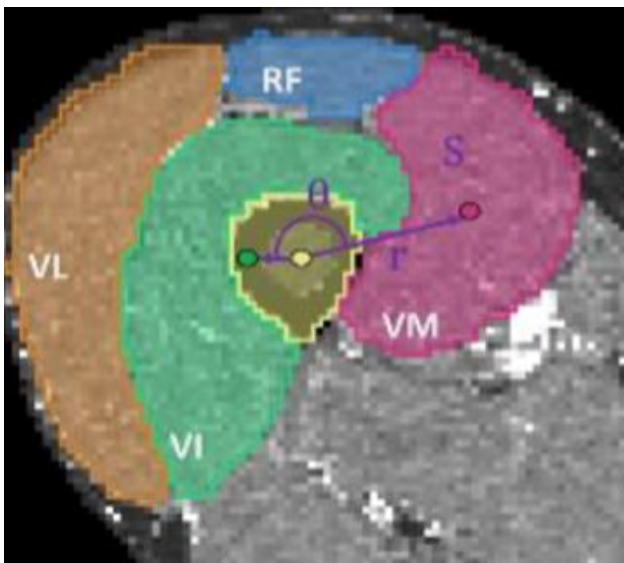


Figure 27. Exemple de représentation des caractéristiques morphologiques.

L'angle représenté ici est celui du vaste médial, calculé grâce à son centre (point rouge), mais aussi grâce au centre du fémur (point jaune) et le centre du vaste intermédiaire (point vert, pris comme

référence). La distance (r pour rayon) est calculée pour les chaque chef, entre leur centre et celui du fémur. L'aire est mesurée pour chaque chef musculaire du quadriceps grâce aux segmentations réalisées.

A partir de ces valeurs, nous avons donc utilisé les 7 patients segmentés entièrement pour tester ces signatures morphologiques, en prenant les 3 atlas les plus proches et en comparant à la précédente méthode utilisée, à savoir l'utilisation des 6 atlas. Cela a confirmé l'intérêt de l'utilisation de ces caractéristiques morphologiques pour sélectionner les atlas les plus proches, car l'utilisation de ces 3 atlas au lieu de 6 permet d'améliorer légèrement les segmentations (DSC passant de 0.877 à 0.912), en divisant par 2 le temps d'utilisation machine, d'environ 50h à 24 pour chaque sujet (le temps machine est proportionnellement linéaire au nombre d'atlas utilisés). De plus, ces variations morphologiques peuvent être utilisé avec les méthodes de Deep-Learning, et l'utilisation d'une méthode U-net entraîné à partir de data augmentée basée sur des caractéristiques morphologiques permet elle aussi l'amélioration de la qualité et surtout de temps machine pour les délimitations de cuisse (45 secondes contre 24h pour la méthode Multi-Atlas).

Ainsi, les données morphologiques de la coupe centrale semblent bien représenter les caractéristiques de l'ensemble du quadriceps, et permettent de différencier plusieurs morphotypes. L'intégration de ces données morphologiques au préalable d'une méthode de segmentation non supervisée permet de sélectionner au mieux l'atlas correspondant et de gagner en terme de qualité de segmentation et de temps machine, que ce soit avec les méthodes de Multi-Atlas ou de Deep-Learning, notamment pour les sujets ayant une morphologie musculaire relativement différente.

J - Méthodes non supervisées de segmentation musculaire des ischio-jambiers.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, et avec le Dr Thomas Grenier.

1- Correction des algorithmes et réentraînement à partir de la cohorte MUST

Une méthode de Deep-Learning a été établie sur les quadriceps à partir des segmentations de la cohorte MUST par le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, encadré par le Dr Thomas Grenier. Il nous a paru intéressant d'utiliser cette même méthode sur les ischio-jambiers. La principale différence entre les deux est que les ischio-jambiers ne sont pas un seul et même muscle composé de 4 chefs distincts comme le quadriceps, mais de 3 muscles différents, dont un composé de deux chefs (chefs court et long du biceps fémoral), et pour deux muscles différents (chef long du biceps fémoral et semi tendineux) la présence d'un tendon proximal conjoint. Les muscles ischio-jambiers sont moins trophiques que les chefs du quadriceps, les limites entre les muscles sont en général plus facilement reconnaissables, même chez des sportifs de haut niveau avec des muscles très trophiques, mais ils présentent une complexité plus marquée encore à leurs extrémités, à la naissance ou à la terminaison de leurs muscles. Ces difficultés spatiales seront détaillées dans la sous-partie 4.

Ainsi, pour les ischio-jambiers, à partir de la cohorte MUST, nous avons utilisé les muscles du côté gauche. Afin d'optimiser le travail de délimitation, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme de manière progressive, de cette manière :

- Segmentations 1 à 3 : Délimitations manuelles complètes de 3 patients, chef par chef.
- Segmentations 4 : recalage fusion à partir des 3 premières segmentations puis une correction manuelle experte des segmentations obtenues. Nous pouvons considérer cette méthode comme semi-supervisée.
- Segmentations 5 : recalage fusion à partir des 4 premières segmentations puis une correction manuelle experte.

- Segmentations 6 : recalage fusion à partir des 5 premières segmentations, puis méthode de corrective learning, puis une correction manuelle experte.
- Segmentations 7 : recalage fusion à partir des 6 premières segmentations, puis méthode de corrective learning, puis une correction manuelle experte.

Nous avons par la suite testé la fiabilité de nos méthodes de segmentations non supervisées à partir de ces 7 atlas ainsi créés, et manuellement corrigés, considéré donc comme la référence. Les deux méthodes non supervisées utilisées, à savoir la méthode multi-atlas et la méthode de deep-learning, ont données d'excellents résultats, avec des valeurs moyennes pour les 7 sujets de de 0.926 et 0.949 respectivement pour le DSC, 37.20 et 99.15 pour le HD (mm), 1.10 et 0.68 pour le MAD (mm) et 0.045 et 0.027 pour le VS. A noter que pour la méthode U-Net (deep-learning), le HD élevé mais avec un MAD bas (respectivement 99.15 et 0.027) signifie que la valeur élevée de HD correspond à quelques pixels complètement aberrants, probablement lié au fait que le chef court du biceps fémoral n'est pas présent dans la moitié supérieure, et qu'un pixel sur une mauvaise coupe suffit à attribuer une valeur de HD très élevée.

Afin de comparer ces données à celle uniquement de la coupe centrale, nous avons utilisé 48 coupes centrales (41 délimités spécifiquement en même temps que les quadriceps, et les 7 à partir des atlas entièrement délimités), délimités des deux côtés droits et gauches. Cela nous a montré un résultat assez inattendu, à savoir que le DSC est moins bon sur la coupe centrale que le volume entièrement délimité, avec un DSC respectivement de 0.860 et 0.876 pour les deux côtés confondus, respectivement en multi-atlas et en deep-learning, avec des DSC relativement superposables pour les côtés droit et gauche pris isolément, respectivement pour chaque méthode. Pourtant, la coupe centrale n'est pas exposée aux zones de jonction à première vue. En analysant les résultats, il semble que cet écart soit lié à la naissance du chef court du biceps fémoral, à la face postérieure du fémur au niveau de la ligne âpre. Cette naissance est, comme toutes les extrémités musculaires, à risque d'erreur, ce qui est le cas ici, notamment dans la partie latérale au contact avec le chef long du biceps fémoral. Le groupe musculaire des ischio-jambiers semble donc moins facilement délimitable de manière non supervisée au sein de la coupe centrale que le muscle quadriceps.

2- Application des algorithmes sur la cohorte HAMMER

Après avoir étendue la méthode non supervisée des quadriceps aux ischio-jambiers sur la cohorte MUST, il nous a paru utile d'essayer d'utiliser cette méthodologie sur les patients de la cohorte HAMMER, afin de pouvoir segmenter les patients de manière non supervisée et de pouvoir extraire en premier lieu le volume, mais aussi à terme des paramètres musculaires quantitatifs pouvant être utilisés dans plusieurs situations cliniques. Afin de pouvoir envisager cela, nous avons utilisé les données HAMMER, qui sont est très similaires aux données de MUST en ce qui concerne la qualité des images et la zone d'acquisition. Nous avons cherché à segmenter les images de HAMMER sur la base des segmentations manuelles de MUST. La différence principale résidait dans le fait que les IRM de HAMMER sont réalisées dans une IRM à 3 Teslas, contre 1,5 pour la cohorte MUST. Les mêmes étapes d'expérimentation que précédemment ont été utilisées, à savoir notamment une séparation droite/gauche, une bascule des images du côté gauche, une standardisation en échelle de gris. Un rééchantillonnage a été ajouté afin d'obtenir la même résolution que dans la cohorte MUST. De plus, il a été nécessaire de réaliser une segmentation experte afin d'évaluer la performance de nos méthodes. Celle-ci a été obtenue comme précédemment, à partir d'une segmentation non supervisée d'un sujet HAMMER, segmentation comprenant à la fois les groupes musculaires quadriceps et celui des ischio-jambiers. Après cette étape, il a été utilisé la même méthode multi-atlas que précédemment (recalage/fusion avec trois atlas proches), et en parallèle la méthode de deep-learning Unet, à la fois sur le quadriceps et les ischio-jambiers du même sujet dont les segmentations avaient été manuellement corrigées, afin de pouvoir réaliser une évaluation qualitative.

Malheureusement, les deux méthodes de segmentation non supervisée n'ont pas donné de résultats satisfaisants : la méthode multi-atlas a été à l'origine d'importantes erreurs aux contours des muscles (DSC à 0.909 et MAD à 1.99 pour le quadriceps, et respectivement 0.836 et 3.03 pour les ischio-jambiers), alors que la méthode Unet a quant à elle complètement failli à créer des segmentations cohérentes (DSC à 0.790 et MAD à 4.76 pour le quadriceps et 0.681 et 6.51 respectivement pour les ischio-jambiers). Nous avons voulu nous assurer qu'il ne s'agissait pas d'un problème morphologique, étant donné que ce patient, contrairement à

tous les patients de la cohorte MUST, n'était pas un sujet pratiquant le trail. En utilisant la même méthode que précédemment concernant les caractéristiques morphologiques, nous nous sommes aperçu que ce n'était pas le problème à l'origine de ces segmentations non optimales, le sujet HAMMER utilisé était situé de manière relativement proche avec les sujets MUST. Ainsi, il semble que ce soit la différence de texture entre 3T et 1,5T qui empêche le transfert de notre modèle pré-entraîné de données pour la segmentation musculaire des cuisses à l'aide d'atlas et de modèles entraînés issues d'une 1,5T (données MUST) vers le nouvel ensemble de données acquis sur 3T (HAMMER). Pour la suite, une traduction entre ces deux types de signaux différents devra être étudiée afin d'éviter le fastidieux processus de segmentation manuelle à chaque fois qu'il y a un nouveau signal d'une intensité de champ magnétique différente.

K - Erreurs spatiales des méthodes non supervisées et d'espacement des coupes avec interpolation

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse et avec le Dr Thomas Grenier.

Sur le plan qualitatif, les erreurs inter-opérateurs, les erreurs liées aux méthodes d'espacement des coupes avec interpolation ou les méthodes de Deep-Learning semble globalement exposées aux mêmes types d'erreurs. Ainsi, les zones d'interface muscle/aponévrose, notamment en périphérie du muscle, sont le siège d'erreurs systématiques à différents degrés, notamment par exemple en terme du niveau d'espacement des coupes avant l'étape d'interpolation (Figure 28). Ces erreurs sont assez systématiquement réparties le long du muscle et de manière circonférentielle à ses interfaces avec les fascia.

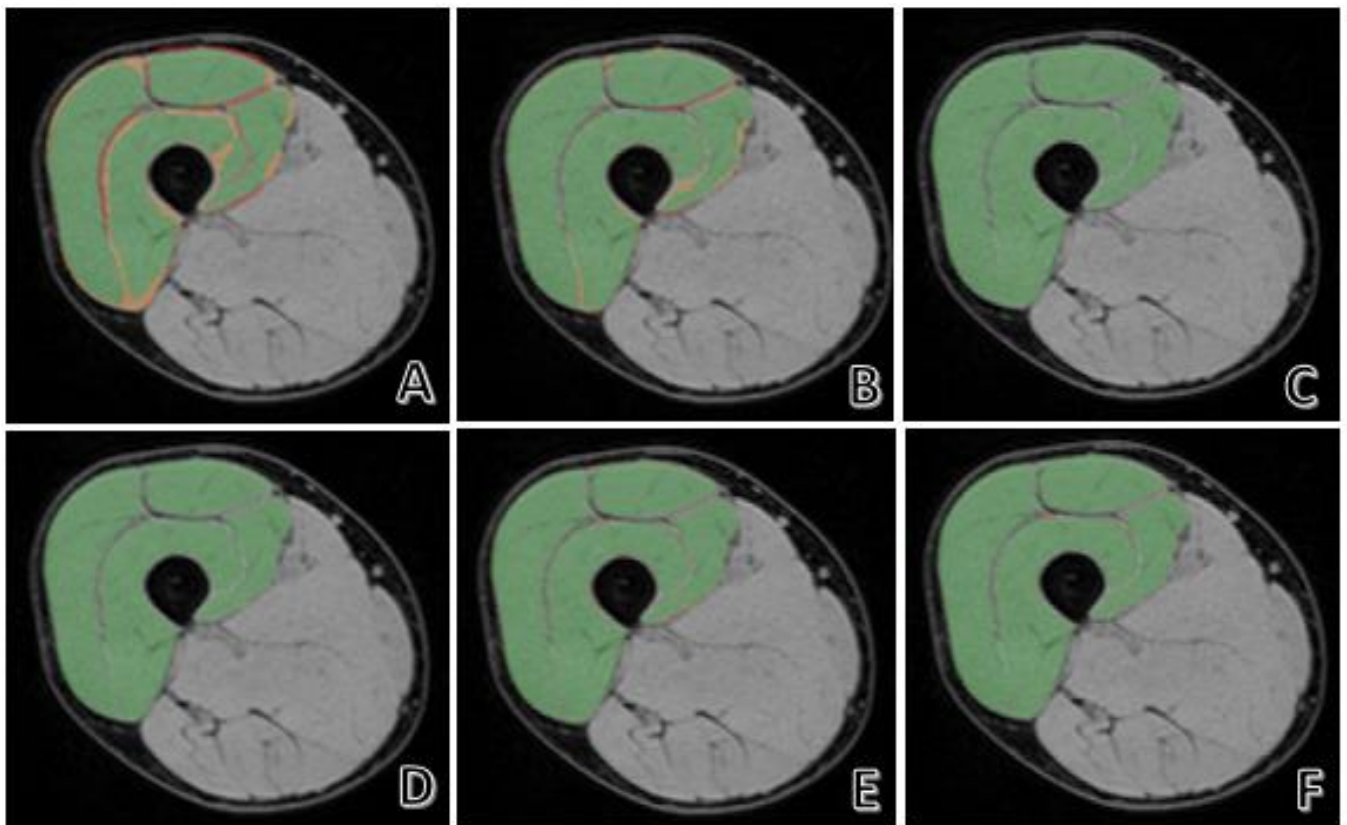


Figure 28. Segmentations élaborées à partir d'espacement des coupes et interpolation, pour le même sujet.

Une coupe est représentée au même niveau de la cuisse, pour tous les atlas, à partir des d'un espacement des coupes en conservant 1%(A), 2%(B), 5%(C), 10%(D), 20%(E), 50%(F). Les pixels en accord sont représentés en vert, les zones de sur-segmentation par rapport à la référence sont représentées en rouge, les zones de sous-segmentation en orange. On s'aperçoit que les zones de

discordance sont essentiellement visibles pour les 1 et 2%, et deviennent plus difficilement décelables à partir du 5%. Les zones de sur segmentation correspondent essentiellement aux fascia intermusculaires, a minima aux fascia péri musculaires (ex : en avant du droit antérieur). Les zones de sous-segmentations correspondent en général à la périphérie musculaire, au contact des fascia (ex : partie postérieure du vaste intermédiaire) mais aussi à quelques zones intra-musculaires, par contre uniquement à 1 et 2%.

Par ailleurs, il existe une erreur moins homogène, liée aux interfaces musculo-tendineuses. Ainsi, ces zones sont particulièrement exposées elle-aussi aux erreurs de délimitations. Tout d'abord, cette erreur est particulièrement liée aux difficultés anatomiques d'un groupe musculaire. Ainsi, à nombre de chefs égal (en considérant le chef court du biceps fémoral comme un chef à part entière), les ischio-jambiers présentent une anatomie beaucoup plus complexe (Figure 29) que le quadriceps, à la fois par leur naissance et leur terminaison, mais aussi par leur conformation tridimensionnelle non ellipsoïdale.

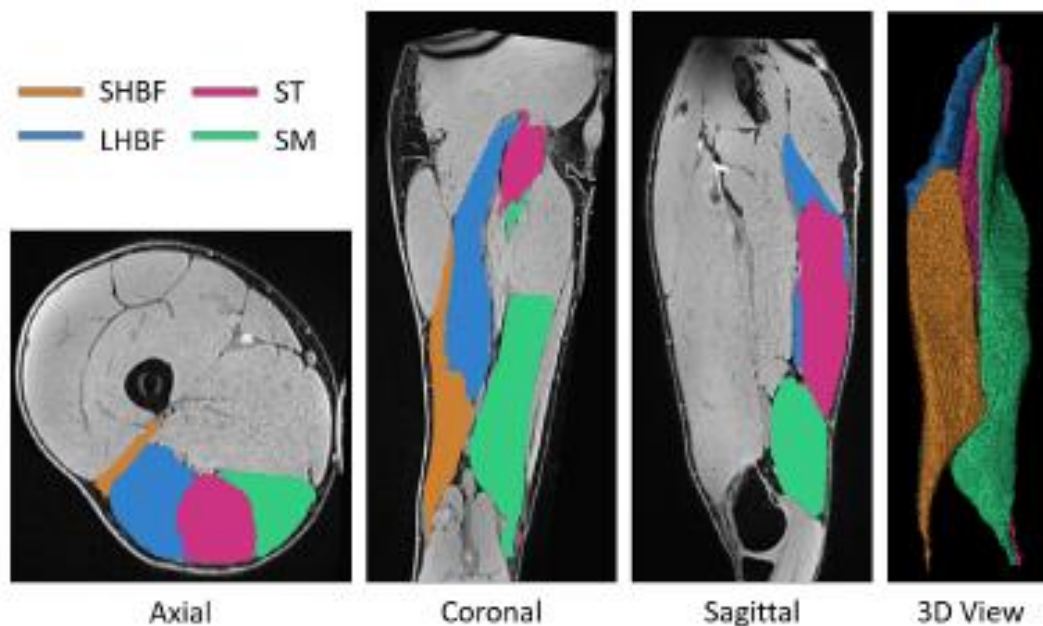


Figure 29. Représentation multiplanaire et tridimensionnelle des muscles ischio-jambiers.

De gauche à droite sont représentées les plans axial, coronal et sagittal, puis la - reconstruction 3D. A la différence des différents chefs du muscle quadriceps qui ont tous une forme ellipsoïdale, les muscles ischio-jambiers ont chacun une forme complexe non ellipsoïdale et différente les uns des autres.

De plus, à l'intérieur de chaque groupe musculaire, il existe d'importantes disparités. Par exemple, sur le Quadriceps Femoris, le chef droit antérieur est beaucoup moins complexe à délimiter que le vaste interne. Les zones de segmentation complexes, maîtrisables par la bonne connaissance anatomique de l'œil humain entraîné, peuvent toutefois mettre plus facilement les autres méthodes en difficulté, et être à l'origine de zones de délimitations aberrantes (Figure 30).

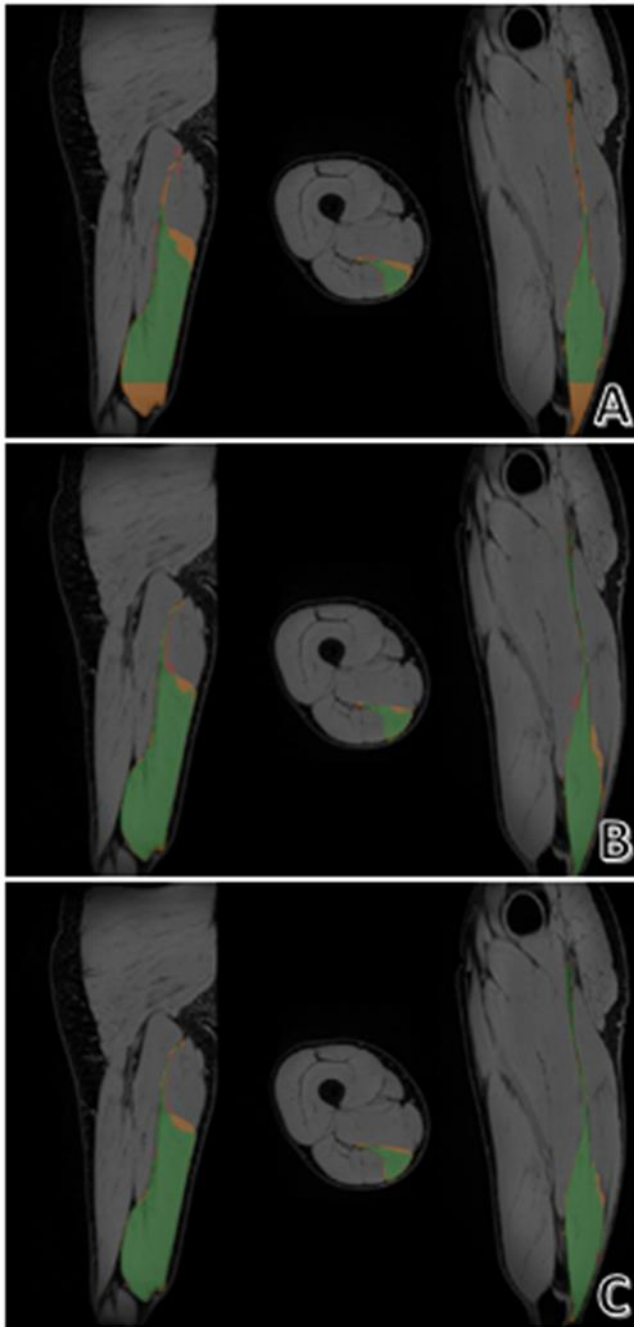


Figure 30. Représentation des segmentations élaborées pour un même sujet sur le muscle semi-membraneux.

Les segmentations ont été établies à partir de 1% des coupes avec interpolation, (A), à partir de la méthode MultiAtlas de Wang (B) et de Deep-Learning (Unet) (C). Les pixels en accord avec la référence sont représentés en vert, les zones de sur-segmentation par rapport à la référence sont représentées en rouge, les zones de sous-segmentation en orange. Les images sont centrées sur la naissance du semi-membraneux, dont la longue jonction myo-tendineuse proximale (membrane) est source d'erreur, quelle que soit la méthode.

Concernant les méthodes de délimitations non supervisées (MultiAtlas et Deep Learning), on retrouve globalement les mêmes localisations des erreurs entre-elles, avec là-aussi notamment les zones de jonction musculo-tendineuse. Un exemple est donné dans la Figure 31.

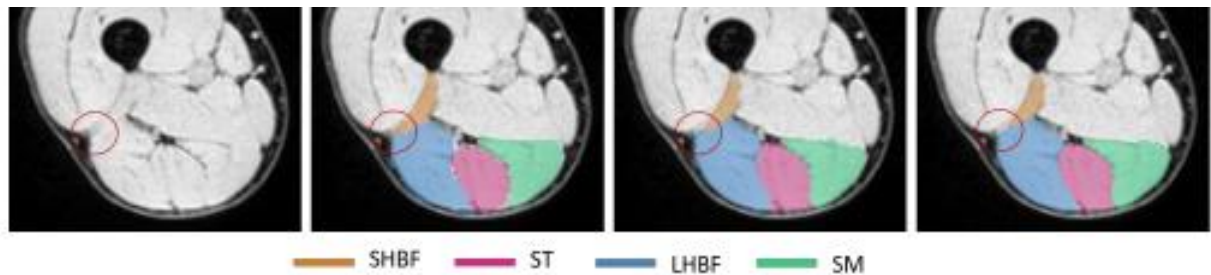


Figure 31. Représentation de la coupe centrale des ischio-jambiers d'un patient de la cohorte HAMMER.

De gauche à droite sont représentées l'image native, la segmentation manuelle, puis les segmentations non supervisées par les méthodes MultiAtlas (JLF+CL) et de Deep Learning (Unet). Le rond rouge permet de visualiser une zone particulièrement difficile à délimiter, à savoir la partie latérale de la naissance du chef court du biceps fémoral (SHBF), situé en avant du chef long (LHBF), en arrière du chef vaste latéral et du vaste intermédiaire, et en arrière et latéralement par rapport au fémur. On peut s'apercevoir que les deux segmentations non supervisées font la même erreur par rapport à la segmentation manuelle, à savoir un défaut de segmentation de la fine partie latérale du muscle.

L - Fiabilité de l'estimation du volume musculaire : évaluation des méthodes d'espacement des coupes avec et sans interpolation et des méthodes non supervisées

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Hoai-Thu Nguyen au cours de son travail de thèse, avec le Dr Thomas Grenier et le Dr Magalie Viallon-Croisille.

1- Introduction

En complément de ces métriques évaluant la fiabilité des segmentations, le volume musculaire en soi est un élément très important. La quantification du volume musculaire est aujourd'hui devenue incontournable pour la plupart des besoins physiopathologiques et/ou cliniques. Les muscles de la cuisse sont ceux qui sont le plus souvent explorés car leur volume est très sensible à diverses contraintes physiologiques et pathologiques (Agosti et al. 2021; Hioki et al. 2020a; Kemnitz et al. 2020; Kulas et al. 2018; Yamauchi, Kato, et Kato 2019). D'un point de vue scientifique, le volume musculaire permet également de tester par exemple l'efficacité de différents exercices de renforcement musculaire (Fukunaga et al. 2001). Dans le contexte médical, la quantification du volume musculaire est cruciale à la fois dans la mise en place de traitements médicaux ou chirurgicaux, et dans le suivi de ces traitements (Panisset et al. 2022). En outre, l'estimation du volume des muscles de la cuisse présente un grand intérêt dans le contexte de l'entraînement (Mallinson et al. 2020), du vieillissement (Hogrel et al. 2015), et dans de nombreuses situations pathologiques telles que, par exemple, les blessures musculaires chez les athlètes (Mühlenfeld et al. 2022), la performance (Safar Cherati et al. 2016), les maladies musculaires et ostéoarticulaires (Agosti et al. 2021; Kemnitz et al. 2020; Yamauchi, Kato, et Kato 2019) et neuromusculaires (Panisset et al. 2020), les maladies métaboliques respiratoires (Vivodtzev et al. 2018), l'immobilisation (Kilroe et al. 2020a), la rééducation après une intervention chirurgicale (Baron et al. 2020; Birchmeier et al. 2020; Iversen, Røstad, et Larmo 2016), en particulier pour les ischio-jambiers après une reconstruction du ligament croisé antérieur à l'aide d'un greffon d'ischio-jambier (Rush, Norte, et Lepley 2020).

Il faut bien différencier l'estimation du volume musculaire global, de celui de l'estimation de chaque chef musculaire pris séparément, exercice plus exigeant, car les erreurs réalisées sur

chaque chef musculaire peuvent plus ou moins se compenser, ou du moins se réduire, en considérant le volume musculaire dans son intégralité.

La mesure de référence du volume musculaire est établie à partir de la segmentation de toutes les coupes musculaires, les plus fines possibles, en général millimétrique voire infra millimétrique. La difficulté réside dans le temps consacré à ces segmentations, exercice très fastidieux et très consommateur en temps. Il faut compter environ 40 à 50 heures de travail pour réaliser une segmentation de tous les chefs musculaires du quadriceps ou des ischio-jambiers pour un seul patient et sur un seul côté, sur des coupes espacées de manière millimétrique. Ainsi, plusieurs méthodes ont été proposées pour pouvoir s'affranchir de ce problème, que ce soit sur les ischio-jambiers ou les chefs du quadriceps. Ainsi, un espacement des coupes permet de réduire le temps nécessaire aux délimitations. Une estimation du volume est ensuite réalisée, soit directement (par exemple avec la méthode de Cavalieri) (Nordez et al. 2009), ou en réalisant une interpolation entre les coupes. Il a ainsi paru essentiel de pouvoir tester la fiabilité de ces méthodes d'espacement des coupes, avec ou sans interpolation, pour estimer le volume musculaire (partie 2).

En parallèle, le développement des méthodes d'Intelligence Artificielle permet de pouvoir envisager à terme de ne plus avoir à passer par l'étape longue et fastidieuse des segmentations pour obtenir le volume musculaire. Toutefois, que ce soit avec les méthodes de Multi-Atlas (méthode de Wang) ou les méthodes de Deep Learning (notamment la méthode U-Net), connaître la fiabilité des délimitations est primordiale pour pouvoir affirmer une modification de volume musculaire avec une précision donnée. La fiabilité des segmentations est un élément testé de manière systématique pour les méthodes d'Intelligence Artificielle, car elle permet de tester la fiabilité de ces méthodes en permanente évolution. Toutefois, leur fiabilité sur l'évaluation du volume musculaire n'a pas été évalué jusqu'à présent (partie 3).

2- Estimation du volume musculaire par les méthodes d'espacement des coupes

a- Introduction

Depuis longtemps, il a semblé important de connaître le volume musculaire dans des situations physiologiques et de nombreuses situations pathologiques, et d'évaluer l'évolution

de celui-ci. La littérature est particulièrement riche concernant le volume musculaire des cuisses. Etant donné le caractère très fastidieux de la méthode la plus fiable, c'est-à-dire la délimitation coupe par coupe et pour chaque chef musculaire, sur des coupes les plus fines possibles, plusieurs méthodes ont été utilisées pour avoir une estimation de ce volume musculaire, avec une très grande hétérogénéité. Même en considérant uniquement les muscles de la cuisse. Certains auteurs ont utilisé uniquement une ou quelques coupes de hauteur prédéfinies. Enfin, il a souvent été utilisé une technique d'espacement des coupes, permettant de réduire le nombre de coupes à délimiter. Cette méthode peut être associée à une interpolation entre les coupes (Maden-Wilkinson et al. 2020). Peu de travaux se sont vraiment attachés à la fiabilité de ces mesures. Il a ainsi paru essentiel de pouvoir tester la fiabilité de ces méthodes d'espacement des coupes avec ou sans interpolation pour estimer le volume musculaire.

“Quantification of quadriceps and hamstring muscle volume: toward an optimal strategy using sparse segmentation”

Sylvain Grange, Thu Nguyen, Thomas Grenier, Magalie Viallon, Pascal Edouard, and Pierre Croisille.

Article en cours de soumission

Keywords: *Muscle, Quadriceps, Hamstring, MRI, Volumetric estimation, Sparsed Segmented Datasets, Interpolation.*

Abbreviations: Magnetic Resonance Imaging (MRI); Anatomical Cross-Sectional Area (ACSA); three-dimensional (3D); Quadriceps Femoris (QF); Rectus Femoris (RF); Vastus Lateralis (VL); Vastus Intermediata (VI); Vastus Medialis (VM); Hamstring muscle (HS); Semi-Membranosus (SM); Semi-Tendinosus (ST); Long head of the biceps Femoris (BL); Short head of the biceps femoris (BS); Region of Interest (ROI); Coefficient of Repeatability (CR); Bland-Altman (BA); Sparsed Segmented Datasets (SSD); Interpolation (IT).

Abstract

Introduction. Determining muscle volume is necessary for both scientific and medical purposes. In medical context, it is useful both in the implementation of medical or surgical treatment, and in the monitoring of these treatments. The quadriceps and hamstrings muscles are the most used muscles in this context. Error of muscle volume estimation is important, especially in cases with small variations. The error of volume estimation methods used in the literature, i.e., from sparsed segmentations with or without interpolation, and for different sparsed segmented datasets, has never been accurately assessed. *Materials and Methods.* Seven subjects for quadriceps and hamstring muscles were used from the MUST cohort. All Magnetic Resonance Imaging (MRI) slices of the quadriceps and hamstring muscles were manually segmented on each muscle head, and on each slice of 780 μm , and used as a reference value. Sparsed segmentations were created using a sub-sampling method, and were used to create two sets of data (with or without interpolation) for different slices spacing. The volumes estimated methods were compared to the reference volume with absolute and relative volume difference, the Coefficient of Repeatability (CR) and the bias. *Results.* The main findings of the present study were that the error of quadriceps and hamstring muscle volume estimation, by taking sparse segmentation, ranging from approximately from 0.1 to 10.5% for QF and from 0.6 to 11.9% for HS, depending on the use or not of interpolation. The use of 10% of the muscle slice, with an interpolation method, seem the best compromise precision/time saving, but must be adapted to the desired precision. *Discussion.* The degree of reliability of muscle volume estimation methods varies widely, and should be an essential element to know

precisely before concluding a difference. A strategy with 10% of slices, combined with interpolation, seems to be a good compromise between accuracy and time.

1. INTRODUCTION

The quantification of muscle volume is now becoming a must-have for most pathophysiological and/or clinical needs. The thigh muscles are the ones that are most often explored (Agosti et al. 2021; Asakawa et al. 2002; Hioki et al. 2020a; Iversen, Røstad, et Larmo 2016; Kemnitz et al. 2020; Kulas et al. 2018; Panisset et al. 2020; Tate et al. 2006; Yamauchi, Kato, et Kato 2019), because their volume is very sensitive to various physiological and pathological constraints. (Kilroe et al. 2020a) The two main compartments are the quadriceps femoris (QF), composed by the rectus femoris (RF), the vastus lateralis (VL), the vastus intermediate (VI) and the vastus medialis (VM); and the hamstring (HS) composed by the semimembranosus (SM), the semitendinosus (ST), the long head of the biceps femoris (BL), and the short head of the biceps femoris (BS). From a scientific point of view, muscle volume also makes it possible to test for example the effectiveness of various muscle strengthening exercises. (Fukunaga et al. 2001; Mallinson et al. 2020) In medical context, quantifying muscle volume is crucial both in the implementation of medical or surgical treatment, and in the monitoring of these treatments. (Panisset et al. 2020) Moreover, estimating muscles thigh volume is of high interest in the context of training, (Mallinson et al. 2020) aging (Francis et al. 2017; Hioki et al. 2020a; Hogrel et al. 2015; Trappe, Lindquist, et Carrithers 2001a) and in many pathological situations (Agosti et al. 2021; Baron et al. 2020; Baumgart et al. 2021; Birchmeier et al. 2020; Farrow et al. 2021; Gray et al. 2011; Iversen, Røstad, et Larmo 2016; Kemnitz et al. 2020; Kilroe et al. 2020a; Kulas et al. 2018; Mühlenfeld et al. 2021; Panisset et al. 2020; Rush, Norte, et Lepley 2020; Safar Cherati et al. 2016; Sprague et al. 2018; Vivodtzev et al. 2018; Yamauchi, Kato, et Kato 2019).

In this context, muscle volume must be reliably quantified, especially in cases where the expected variation might be small or measured accurately. The current reference method remains expert manual segmentation of all slices required encompassing the whole muscle with the thinnest slice thickness to limit partial volume effect (Barnouin et al. 2014), that represent ~600 slices (with a thickness of 1mm and with no gap) to explore thigh muscles. Magnetic Resonance Imaging (MRI) stands as a reference, as it allows the best precision of delimitation, especially at the level of the muscle/aponeurosis interfaces. (Barnouin et al. 2014) In addition, MRI is a non-irradiating examination and can be used more easily in research. Until now, manual drawing of these regions of interest (ROI) has been considered the standard in clinical studies, with an excellent reliability of manual segmentation was reported when assessing cross-sectional areas and therefore the volume of individual QF and HS muscles using MRI. (Barnouin et al. 2014) Nevertheless, the segmentation of MR images of muscles requires dedicated and experienced human operators, extensive post-processing time and learning curves. This is particularly true especially when the goal is to quantify the volume of each muscles head, that are more difficult to delineate than the entire muscle compartment. Therefore, because the task is cumbersome and challenging, many studies in the past ten years have tried to find faster alternatives to reduce the requirement for complete coverage and time-consuming manual segmentation of all muscles. Various strategies have been tested, using variable sparsed segmented datasets (SSD). (Barnouin et al. 2014; Evangelidis et al. 2016; Franchi et al. 2014a; Fukunaga et al. 2001; Hogrel et al. 2015; Kulas et al. 2018; Tate et al. 2006; Torğutalp et al. 2021; Trappe, Lindquist, et Carrithers 2001a) Despite these attempts, there is still no consensus on a validated standardized simplified procedure for muscle segmentation, at the price of an error of the measurements that remains significant. (Franchi et al. 2014a; Mallinson et al. 2020; Morse, Degens, et Jones 2007;

Torğutalp et al. 2021; Trappe, Lindquist, et Carrithers 2001a) A segmentation of all the slices may not be necessary and could appear as a waste of time considering the redundancy of the information in very close slices. Indeed, a clinical question may not require a response of maximum precision to estimate the atrophy or hypertrophy, compare several populations, the evolution between two periods or a predisposing factor for example. Nevertheless, it is essential to know the degree of precision of muscle volume measurement for a given method in order to formally conclude if this one is adequate. This precision is rarely discussed and reported. (Morse, Degens, et Jones 2007; Pons et al. 2018)

Recently, strategies of interpolated segmentations from human-made SSD has been proposed (Nordez et al. 2009). These semi-supervised segmentations provided such approaches can be robust and reproducible, they hold promise for both clinical and research purposes by being fast, enabling full segmentation and avoiding to resign ourselves to compromises and partial segmentations for pure consideration of time saving. Measuring the degree of error of muscle volume estimation is of crucial, especially since these methods may face various issues: dependency on their training datasets (sedentary vs. athletes, volunteers vs patients, etc...), difficulties in delineating musculo-tendinous junctions, compatibility between different MRI acquisitions (field strength, sequence characteristics, etc.).

In this context, the objective of this study was to compare the performance of muscle volume estimation of QF and HS and each of their muscle heads, between 1) Sparsed Segmented Datasets (SSD) without interpolation 2) Sparsed segmentation without interpolation (IT), with

variable sparsity for each method, in comparison with the reference volume obtained from the manually delineated complete muscle segmentation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study population

This study retrospectively used the MRI performed on the quadriceps of the athletes enrolled on the MUST study during the 2014 "Tor des Géants" mountain ultramarathon, and was previously described.(Nguyen et al. 2021) This study was approved by the local ethical committee (Aosta Valley, Azienda USL 101/946), and the experimental view was conducted in accordance with the Helsinki Declaration (2001). Patients were volunteered and provided informed written consent to participate in this study. Seven pre-race datasets from six men and one woman were used. Supplementary data 1 is summarizing all demographic data of the studied population.

2.2. MRI Datasets

Seven QF and HS MRI datasets were used for the study. They were reconstructed using an isotropic three-dimensional (3D) dual-Echo gradient-echo sequence, acquired before the race, on the mobile 1.5 T MR scanner system (MAGNETOM Avanto, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany, located within a truck from Alliance Medical, England). A standard coil configuration was used for the acquisition: a flexible 4-channel array surface coil, combined with 4 elements of the spine coil embedded in the bed, resulting in an 8-channel coil in total. The coronal acquisition included the entire upper leg, from the anterior superior iliac spine to the upper

third of the tibia, in order to explore the whole QF and HS muscle groups, with a native 780 μm slice thickness. The voxel size was $0.781\text{mm} \times 0.781\text{mm} \times 1.3\text{ mm}$. The total coverage in the z-direction was 20.8 mm and an explored 3D volume of $437.5 \times 500 \times 208\text{ mm}^3$, i.e. an in-plane field of view (FOV) of $437.5 \times 500\text{ mm}^2$. The pixel-wise volume size is $560 \times 640 \times 176$. The reconstruction of the water and the fat images from the acquired dual-echo data sets was performed inline (Syngo software, Siemens healthcare, Erlanger, Germany) using a Dixon approach enabling four 3D isotropic in-phase, out-phase, fat and water. Only the water image was used, as it provides a better contrast between muscle and fascia.(Lins, Salmon, et Nogueira-Barbosa 2021)

2.3. Muscle segmentations

The native coronal water images were loaded into 3D-slicer program (v4.11)(Fedorov et al. 2012). All the QF and HS muscle heads were manually and individually segmented in the reformatted axial view by an expert radiologist in musculoskeletal imaging (SG) using a graphic tablet for accurate delineation (Wacom Intuos CTL4100). Each 780 μm muscle section was delimited, corresponding to around 600/650 reconstructed axial sections, or around 40 hours per muscle compartment. Multi-planar reconstructions were subsequently used to control and/or refine the segmentations, carefully optimizing each muscle head masks, while exploiting the visible perimuscular fascia or deducing the limits from multi-planar coherence. Figure 1 illustrate a typical example of the segmentation of the QF muscle heads in axial view and simultaneous visualization of resulting masks in multiple views. To obtain the QF volume, the four individual segmented muscles were summed, as for the HS.

2.4. Generation of sparsed segmented datasets (SSD)

To explore the impact and quantify the bias resulting from partial segmentation of the data as a representative measure of the entire muscle volume, SSD were organized to sample 1, 2, 5, 10, 20 or 50%, (number representing the percentage of axial slices kept) of equally-spaced slices originating from the completely demarcated muscle volume, used a python script.(McCormick et al. 2014) This corresponds to most of the sparse segmentation scenarii proposed in the literature.(Franchi et al. 2014a; Hogrel et al. 2015; Mallinson et al. 2020; Torğutalp et al. 2021)A representation of the resulting sparse MRI images on QF is shown in figure 2. The undersampling was situated between 0.01 (1% of the slices were preserved) and 0.5 (half of the slices were preserved).

For each image volume, the first and the last axial with segmentation (meaning with one of the interested muscle heads) are identified. For each segmentation datasets, the number of slices to kept is X% of the number of slices between the two slices identified above (1, 2, 5, 10, 20 or 50%). The slices were sampled with an equal distance between them, and the top and the bottom slices were added.

2.5. Generation of interpolation images

Sparse segmentations were then interpolated the morphological contour interpolation, to obtain a complete volume from each dataset (1, 2, 5, 10, 20 or 50%) with the morphological contour interpolation specialized for anatomical images.(Albu, Beugeling, et Laurendeau 2008)

2.6. Estimation of the volume of each muscle head and the entire QF and HS from MRI Sparsed Segmented Datasets (SSD)

The first method (without interpolation) is named SSD (Sparsed Segmented Datasets). The second is called IT (Interpolation). The muscle volume (cm^3) was further calculated by multiplying the ACSA (Anatomical Cross-Sectional Area) of each individual muscle by the slice thickness for all analyzed images of the according to the following formula: $\text{Volume (cm}^3) = \sum \text{ACSA} * (\text{slice thickness} + \text{gap between slices})$, that can be reformulated as $\text{Volume (cm}^3) = \sum \text{ACSA} * (\text{slice thickness}/\text{undersampling})$ as there was no gap between slices. Secondly, the slices were summed to obtain the entire QF and HS volume.

First, the volume of all individual muscle heads slices, was extracted from manual segmentation with a sub-millimeter slice thickness of $780 \mu\text{m}$, performed by the expert, and was used as a reference examination. Then, for the first method (SSD, without interpolation), the Cavalieri method was used to estimate the muscle volume.(Nordez et al. 2009) For the second method (IT, with interpolation) the volume was established from all the segmentations performed according to the formula: $\text{Volume (cm}^3) = \sum \text{ACSA}$, as there was no gap between slices (slices retained from manual segmentation and slices produced by interpolation).

2.7. Statistical analysis

The reference QF and HS volumes, such as each muscle heads volume, were then compared with the muscle volumes estimated from the sets of sparsed slices, without (Sparsed Segmented Datasets, SSD) or with interpolation (IT). For the demographic data, a mean and standard deviation were performed for the continuous variables using Prism. A Bland-Altman approach(Bland et Altman 1986) was used to estimate the bias and the calculation of the

Coefficient of Repeatability (CR). The bias and the agreement limits provide the variation of the values of one technique compared to the other. The CR is a number that, if you make two measurements of the same thing under the same conditions, the difference between those two measurements will be less than the RC in 95% of cases. The bias and CR were expressed in mL. All statistics were performed using Stata (17.0, StataCorp, College Station, Texas). The inter-observer correlations were realized between the experts, taking as reference, and another experimented radiologist. We used 5 image volumes of quadriceps muscle manually segmented. The comparison of the datasets when previously described.(Nguyen et al. 2021)

3. RESULTS

3.1. QF, HS and each muscle heads volume

All results of the QF, HS and each muscle heads absolute and relative volume, with the SSD and IT methods, are expressed in comparison with the reference and presented in Supplementary Data 2 and 3.

The average QF volume was $2193 \pm 470 \text{cm}^3$. Our female subject (number 5) had a significantly lower volume (1322cm^3) than the male participants (whose volumes were between 1869 and 2714cm^3). For the HS, the average muscle volume was about $875 \pm 459 \text{cm}^3$, which less muscle volume in woman patient (611.8cm^3).

Concerning the difference in volume estimates between techniques, we can see that interpolation added to slice spaced strategy gives a better estimate of volume than without interpolation. This is true for both the quadriceps and hamstrings, and their respective chiefs taken separately. The difference is interesting to note for 10% of slices. Thus, the difference

in relative volume is 9.1 and 0.6% for the SSD method versus -0.8% and 10.3% for the IT method, for the QF and the HS, respectively.

Within the interpolation method, the realization of 50 to 5% of the slices, changes only very little the precision of the measurement, from 0.1% to -1.7% for QF and from 1.5% to -0.8% for HS. It is different for the passage from 5 to 1% of the slices: the precision goes from -1.7 to -10.3% for the QF and -0.8 to -8.9% for the HS, respectively.

3.2. Bland-Altman (BA) and Coefficient of Repeatability (CR)

Figure 3 shows the difference between the different volume estimation methods in relation to the reference method, for QF and HS. The measurement of the bias makes it possible to confirm the results of the volume estimation in relative and absolute values, on the muscles as a whole (QF and HS) but also on each separate head. We can see that for the interpolation method, with an increasing number of slices, the bias is reduced as we go along to get closer to 0. This is not the case for the US method. All the BA results are presented in Supplementary Data 4 and 5.

Figure 4 shows the difference between the different volume estimation methods in relation to the reference method, for QF and HS. Such as the bias, the measurement of the CR makes it possible to confirm the results of the volume estimation in relative and absolute values, on the muscles as a whole (QF and HS) but also on each separate head. It can be seen that for the interpolation method, with an increasing number of slices, the coefficient of repeatability is

reduced as we go along. This is not the case here either for the US method. All the CR results are presented in Supplementary Data 6 and 7.

3.4. Anatomic distribution of error

Figure 5 shows the representation of segmentations produced using different sets of sparsed slices and interpolation, for one subject. It can be seen that areas of discordance are mainly visible at 1 and 2%, and become more difficult to detect at 5% and above. Visually, there's no difference between segmentation based on 5 or 50% of slices ; yet, this requires 10 times more manual segmentation work. Areas of over-segmentation correspond essentially to intermuscular fascia, and at a minimum to peri-muscular fascia (e.g. in front of the rectus femoris). Areas of sub-segmentation generally correspond to the muscle periphery, in contact with the fascia (e.g. posterior part of the vastus intermedius), but also to a few intramuscular zones, but only at 1% and 2%.

3.5. Time saving with spaced sliced strategy

Time savings are proportional to slice spacing. Thus, this means that segmentating 5% of all slices will be 20 times more effective. The cavalieri method makes it easy to calculate volumes, and can be automated. For the second method (IT), we must take into account that the post-processing time for interpolation must be included, which is nevertheless quite rapid.

4. DISCUSSION

This study questions in a very pragmatic way the added value of interpolation methods to quantify muscle volumes obtained by high resolution volumetric MRI acquisition. It proposes a comparison of two basic but clinically compatible partial segmentation strategy methods, and currently the only one acceptable with the clinical constraints of daily routine and the limited time available to radiologists. The main findings of the present study are that thigh muscle volume estimates vary widely with different estimation strategies and slice spacing for both the quadriceps and hamstrings, roughly from 0.1 to over 10%. This difference is found both on the overall muscle and on each muscle head, and confirmed by the measurement of the bias and the CR.

4.1. Muscle volume and error of measurements

The average QF volume was 2221cm³. Our female subject had a significantly lower volume (1322cm³) than the male participants (whose volumes were between 1869 and 2714 cm³). These data are in agreement with the literature, the total volume of the quadriceps were often approximately between 1300 and 2700 cm³ in healthy adult athletes.(Hogrel et al. 2015; Kulas et al. 2018; Morse, Degens, et Jones 2007; Tate et al. 2006; Torğutalp et al. 2021) For the HS, the average muscle volume was about 875cm³, which less muscle volume in women, which also corresponds to the literature(Hogrel et al. 2015).

Few reports also describe sparse measurement of Anatomical Cross-Sectional Area (ACSA) in few axial slices of the quadriceps to estimate its complete volume(Barnouin et al. 2014; Franchi et al. 2014a; Le Troter et al. 2016; Mallinson et al. 2020; Mandić et al. 2020; Torğutalp

et al. 2021). On the other hand, several studies choose to select only one slice, in general at predefined distances from the patella^{5,30,41}. Sometimes, the chosen slice was identified as the one equidistant from the head of the femur and the tip of the patella (Morse, Degens, et Jones 2007). Only rare authors give an order of error for the estimation of the volume of the quadriceps muscle, for example 10% from a single slice. (Morse, Degens, et Jones 2007)

Not surprisingly, the IT method is much more accurate than the SSD method. The SSD method appears to be more inaccurate than the IT method, and does not strictly improve with increasing numbers of segmented slices. For the IT, the greater the number of segmented slices, the closer the estimated volume is to the reference. We realize that segmenting only one slice out of two does not change the volume estimate very much: the error is 0.1% for QF and 1.5% for HS. This is most likely due to the fact that the slices were segmented very closely (slice thickness of 780 μm).

Moreover, the realization of 50 to 5% of the slices, which requires an enormous manual work of segmentation (10 times more slices) changes only very little the precision of the measurement (from 0.1% to -1.7% for QF and from 1.5% to -0.8% for HS). Some authors use slices of 4 (Torğutalp et al. 2021), 5 (Barnouin et al. 2014; Hogrel et al. 2015) or 10mm (Franchi et al. 2014a; Tate et al. 2006; Trappe, Lindquist, et Carrithers 2001a) thickness which corresponds to about 80 or 40 slices on the quadriceps respectively ; this precision may not be necessary. It is different for the passage from 5 to 1% of the slices, values for which precision changes dramatically (from -1.7 to -10.3% for the QF and -0.8 to -8.9% for the HS, respectively).

However, few reports describe the measurement of a few axial slices of the quadriceps to estimate its complete volume (Kulas et al. 2018).

The degree of error of volumetric estimation of the quadriceps is only poorly described in the literature. One study estimates the degree of error at 10% from a central slice. (Morse, Degens, et Jones 2007) Most clinical issues, whether physiological or pathological, require error less better than 10%, and estimating muscle volume from a single slice (about 10% error) (Morse, Degens, et Jones 2007) does not seem to be a suitable method. Performing manual delineations spaced one centimeter apart (i.e., every 12 slices of 780 μm in our study, corresponding to the segmentation of around 50 slices) provides an error that appears acceptable for most clinical, as for example in the measurements of volume difference between left and right side. (Kulas et al. 2018)

4.2. Time saving and compromise time/precision

The Sparsed Segmented Datasets (SSD) allows us to save precious time of segmentation. In fact, with the use of interpolation (IT approach), we can see that the loss of precision is minimal with the use of 10% or more of the slices. Indeed, bias and CR remain very low and the difference in relative volume is always less than 2%, whatever the whole muscle or the affected muscle head. A strategy with 10% of slices, combined with interpolation, seems to be a good compromise between accuracy and time.

4.3. Strengths

To our knowledge, our study is the first to evaluate the error of sparsed segmented datasets, with or without interpolation, in comparison with the reference method (manual segmentation of the entire muscle volume). In addition, the IT method had never been compared with the reference value. Having a clear idea of the error of these methods in estimating muscle volume is essential, especially in clinical studies with therapeutic

modifications. In our study, the muscular volume of the QF and HS was realized from the delimitation of the sum of the four muscular heads of the quadriceps previously delimited separately, and not from a global delimitation, and thus inevitably coarse, of the whole quadriceps or hamstring muscular compartment.(Nuell et al. 2019a; Torğutalp et al. 2021)

Furthermore, the muscle segmentations have been done by an expert in musculoskeletal imaging, which is quite rare, and which is a significant advantage of our study, even if this delimitation cannot be considered as perfect. In the literature, segmentations are often described by non-experts(Tate et al. 2006; Torğutalp et al. 2021), sometimes students, whose ability to properly delineate the muscles are not clearly proven. In addition, some anatomical regions are very difficult to delineate: in the quadriceps, certain regions such as the boundary between the vastus lateralis and the vastus intermedius are very difficult to define without solid anatomical knowledge.(Barnouin et al. 2014) More, the proximal segmentation between the ST and SM is also very difficult. In addition, the subjects used, namely ultratrailers with a lot of muscle and little fat, and therefore little visible fascia, are probably the most difficult subjects to segment.

4.4. Limitations

Our cohort is based only on young sports patients: its applicability to cohorts of sick or elderly patients may be questionable. Nevertheless, we can therefore expect that the error on less muscular subjects, especially elderly or pathological subjects, will be even smaller. Moreover, these were MRI scans performed on a 1.5T, the error of the delineations can be discussed in comparison with those performed on a 3T. Furthermore, the error of these measurements is also different between the different muscular loges, and the quadriceps is probably not the

most difficult muscle to delineate. However, HS seems to be one of the more difficult muscular logs to delineate, the muscular heads being very little linear.

In addition, the literature increasingly describes a significant difference between men and women, both in terms of volume and in terms of muscle morphology. (Hogrel et al. 2015; Nuell et al. 2019a) The presence of a single female subject in our study may induce a bias. It could be interesting to compare the different degrees of error of muscle volume estimation between men and women.

4.5. Conclusion

The degree of reliability of muscle volume estimation methods varies widely, and should be an essential element to know precisely before concluding a difference. When slice spacing is combined with interpolation, however, accuracy remains good up to a threshold of 5% of slices, and deteriorates more markedly when only less than 5% of slices are segmented. A strategy with 10% of slices, combined with interpolation, seems to be a good compromise between accuracy and time.

5. PERSPECTIVES

Although the use of sparse slices with or without interpolation are methods that make it possible to avoid manual segmentations of all the slices, it is necessary to be aware of the degree of precision of each of the methods, in particular to compare the evolution of the muscle volume according to an external intervention. The degree of reliability of these methods of estimating muscle volume is an essential element to know precisely before

concluding that there is a difference during an intervention or when comparing two populations. Further studies seem essential to estimate the error of muscle volume estimation under different conditions, especially in other muscle groups.

In order to prepare personalized medicine in the various fields where imaging and muscle estimation are involved, the use of a minimum of segmentations can give quick answers to the clinician, and can quickly adapt the medical management, keeping in mind the precision needed to answer the clinical question and the precision of the method used. Automated segmenting methods, once well-developed and accurate, will likely enable future use in routine practice, both in research and in routine clinical practice. These methods of estimating muscle volume should be rigorously evaluated in each given condition.

References

- Agosti, Abramo et al. 2021. « Deep Learning for Automatic Segmentation of Thigh and Leg Muscles ». *Magma (New York, N.Y.)*.
- Albu, Alexandra Branzan, Trevor Beugeling, et Denis Laurendeau. 2008. « A Morphology-Based Approach for Interslice Interpolation of Anatomical Slices from Volumetric Images ». *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55(8): 2022-38.
- Asakawa, Deanna S., Silvia S. Blemker, Garry E. Gold, et Scott L. Delp. 2002. « In Vivo Motion of the Rectus Femoris Muscle after Tendon Transfer Surgery ». *Journal of Biomechanics* 35(8): 1029-37.
- Askling, Carl M., Magnus Tengvar, Tõnu Saartok, et Alf Thorstensson. 2007a. « Acute First-Time Hamstring Strains during High-Speed Running: A Longitudinal Study Including Clinical and Magnetic Resonance Imaging Findings ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(2): 197-206.
- . 2007b. « Acute First-Time Hamstring Strains during Slow-Speed Stretching: Clinical, Magnetic Resonance Imaging, and Recovery Characteristics ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(10): 1716-24.

- . 2008. « Proximal Hamstring Strains of Stretching Type in Different Sports: Injury Situations, Clinical and Magnetic Resonance Imaging Characteristics, and Return to Sport ». *The American Journal of Sports Medicine* 36(9): 1799-1804.
- Asking, Carl M., Magnus Tengvar, Olga Tarassova, et Alf Thorstensson. 2014. « Acute Hamstring Injuries in Swedish Elite Sprinters and Jumpers: A Prospective Randomised Controlled Clinical Trial Comparing Two Rehabilitation Protocols ». *British Journal of Sports Medicine* 48(7): 532-39.
- Asking, Carl M., Magnus Tengvar, et Alf Thorstensson. 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): 953-59.
- Balius, Ramon et al. 2019. « Sonographic Landmarks in Hamstring Muscles ». *Skeletal Radiology* 48(11): 1675-83.
- Barnouin, Yoann et al. 2014. « Manual Segmentation of Individual Muscles of the Quadriceps Femoris Using MRI: A Reappraisal ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMIR* 40(1): 239-47.
- Baron, Jacqueline E., Emily A. Parker, Kyle R. Duchman, et Robert W. Westermann. 2020. « Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8(6): 2325967120930296.
- Baumgart, Christian et al. 2021. « Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(16): 8727.
- Becciolini, Marco, Giovanni Bonacchi, et Stefano Bianchi. 2019. « Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine* 38(5): 1367-82.
- Behan, Fearghal P., Thomas M. Maden-Wilkinson, Matt T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2018. « Sex Differences in Muscle Morphology of the Knee Flexors and Knee Extensors ». *PloS One* 13(1): e0190903.
- van Beijsterveldt, A. M. C., I. G. L. van de Port, A. J. Vereijken, et F. J. G. Backx. 2013. « Risk Factors for Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Systematic Review of Prospective Studies ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23(3): 253-62.
- Beltran, Luis, Varand Ghazikhanian, Mario Padron, et Javier Beltran. 2012a. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.

- . 2012b. « The Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit: A Review of the Normal Anatomy, Biomechanics, and Pathophysiology ». *European Journal of Radiology* 81(12): 3772-79.
- Besson, J. M. 1997. « [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain] ». *Drugs* 53 Suppl 2: 1-9.
- Birchmeier, Thomas et al. 2020. « Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 38(3): 598-608.
- Bland, J. M., et D. G. Altman. 1986. « Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement ». *Lancet (London, England)* 1(8476): 307-10.
- Bourne, M. N. et al. 2016. « Muscle Activation Patterns in the Nordic Hamstring Exercise: Impact of Prior Strain Injury ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(6): 666-74.
- Brandser, E. A. et al. 1995. « Hamstring Injuries: Radiographic, Conventional Tomographic, CT, and MR Imaging Characteristics ». *Radiology* 197(1): 257-62.
- Brooks, J. H. M., C. W. Fuller, S. P. T. Kemp, et D. B. Reddin. 2005. « A Prospective Study of Injuries and Training amongst the England 2003 Rugby World Cup Squad ». *British Journal of Sports Medicine* 39(5): 288-93.
- Brooks, John H. M., Colin W. Fuller, Simon P. T. Kemp, et Dave B. Reddin. 2006. « Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(8): 1297-1306.
- Buckthorpe, Matthew et al. 2021. « Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(4): 607-24.
- Campbell, Scot E., Ronald Adler, et Carolyn M. Sofka. 2005. « Ultrasound of Muscle Abnormalities ». *Ultrasound Quarterly* 21(2): 87-94; quiz 150, 153-54.
- Chan, Otto, Angelo Del Buono, Thomas M. Best, et Nicola Maffulli. 2012. « Acute Muscle Strain Injuries: A Proposed New Classification System ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 20(11): 2356-62.
- Chang, Justin S. et al. 2020. « Management of Hamstring Injuries: Current Concepts Review ». *The Bone & Joint Journal* 102-B(10): 1281-88.
- Cohen, Steven B. et al. 2011. « Hamstring Injuries in Professional Football Players: Magnetic Resonance Imaging Correlation with Return to Play ». *Sports Health* 3(5): 423-30.
- Connell, David A. et al. 2004. « Longitudinal Study Comparing Sonographic and MRI Assessments of Acute and Healing Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 183(4): 975-84.

- Constantin-Teodosiu, Dumitru, et Despina Constantin. 2021. « Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *International Journal of Molecular Sciences* 22(21): 11587.
- Crema, Michel D. et al. 2015. « Imaging Techniques for Muscle Injury in Sports Medicine and Clinical Relevance ». *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 8(2): 154-61.
- . 2016. « Acute Hamstring Injury in Football Players: Association between Anatomical Location and Extent of Injury-A Large Single-Center MRI Report ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19(4): 317-22.
- Crema, Michel D., Ivan R. B. Godoy, et al. 2018. « Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play ». *Sports Health* 10(1): 75-79.
- Crema, Michel D., Mohamed Jarraya, et al. 2018a. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- . 2018b. « Imaging-Detected Acute Muscle Injuries in Athletes Participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games ». *British Journal of Sports Medicine* 52(7): 460-64.
- Dalton, Sara L., Zachary Y. Kerr, et Thomas P. Dompier. 2015. « Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(11): 2671-79.
- Danielsson, Adam et al. 2020. « The Mechanism of Hamstring Injuries - a Systematic Review ». *BMC musculoskeletal disorders* 21(1): 641.
- De Smet, A. A., et T. M. Best. 2000. « MR Imaging of the Distribution and Location of Acute Hamstring Injuries in Athletes ». *AJR. American journal of roentgenology* 174(2): 393-99.
- De Smet, AA, et TM Best. 2000. « MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes ». *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY* 174(2): 393-99.
- De Vos, Robert-Jan et al. 2014. « Clinical Findings Just after Return to Play Predict Hamstring Re-Injury, but Baseline MRI Findings Do Not ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1377-84.
- Delvaux, François et al. 2014. « Return-to-Play Criteria after Hamstring Injury: Actual Medicine Practice in Professional Soccer Teams ». *Journal of Sports Science & Medicine* 13(3): 721-23.
- Dictionnaire Larousse.*
- Diemer, Willemijn M. et al. 2021. « Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million

- Sport Exposure Hours ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 51(1): 27-36.
- Dorn, Tim W., Anthony G. Schache, et Marcus G. Pandy. 2012. « Muscular Strategy Shift in Human Running: Dependence of Running Speed on Hip and Ankle Muscle Performance ». *The Journal of Experimental Biology* 215(Pt 11): 1944-56.
- Dunlop, Gordon et al. 2020. « Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 50(4): 829-40.
- Edouard, Pascal et al. 2021a. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport*.
- . 2021b. « Lower Limb Muscle Injury Location Shift from Posterior Lower Leg to Hamstring Muscles with Increasing Discipline-Related Running Velocity in International Athletics Championships ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 24(7): 653-59.
- Edouard, Pascal, Pedro Branco, et Juan-Manuel Alonso. 2016a. « 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): 619-30.
- . 2016b. « 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): 619-30.
- Ekstrand, Jan et al. 2012. « Hamstring Muscle Injuries in Professional Football: The Correlation of MRI Findings with Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 46(2): 112-17.
- . 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): 292-98.
- Ekstrand, Jan, Martin Hägglund, et Markus Waldén. 2011. « Epidemiology of Muscle Injuries in Professional Football (Soccer) ». *The American Journal of Sports Medicine* 39(6): 1226-32.
- Ekstrand, Jan, Justin C. Lee, et Jeremiah C. Healy. 2016. « MRI Findings and Return to Play in Football: A Prospective Analysis of 255 Hamstring Injuries in the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 738-43.
- Ekstrand, Jan, Armin Spreco, Håkan Bengtsson, et Roald Bahr. 2021a. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of

Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.

———. 2021b. « Injury Rates Decreased in Men's Professional Football: An 18-Year Prospective Cohort Study of Almost 12 000 Injuries Sustained during 1.8 Million Hours of Play ». *British Journal of Sports Medicine*.

Ekstrand, Jan, Markus Waldén, et Martin Hägglund. 2016. « Hamstring Injuries Have Increased by 4% Annually in Men's Professional Football, since 2001: A 13-Year Longitudinal Analysis of the UEFA Elite Club Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(12): 731-37.

Evangelidis, Pavlos E., Garry J. Massey, Matthew T. G. Pain, et Jonathan P. Folland. 2016. « Strength and Size Relationships of the Quadriceps and Hamstrings with Special Reference to Reciprocal Muscle Balance ». *European Journal of Applied Physiology* 116(3): 593-600.

Farrow, M. et al. 2021. « Quantitative MRI in Myositis Patients: Comparison with Healthy Volunteers and Radiological Visual Assessment ». *Clinical Radiology* 76(1): 81.e1-81.e10.

Fedorov, Andriy et al. 2012. « 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network ». *Magnetic Resonance Imaging* 30(9): 1323-41.

Fitzpatrick, Anna C., Adam S. Naylor, Peter Myler, et Colin Robertson. 2018. « A Three-Year Epidemiological Prospective Cohort Study of Rugby League Match Injuries from the European Super League ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21(2): 160-65.

Fletcher, Amanda N., Jonathan W. Cheah, Shane J. Nho, et Richard C. Mather. 2021. « Proximal Hamstring Injuries ». *Clinics in Sports Medicine* 40(2): 339-61.

Flores, Dyan V. et al. 2018. « MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 38(1): 124-48.

Franchi, M. V. et al. 2014a. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.

———. 2014b. « Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle ». *Acta Physiologica (Oxford, England)* 210(3): 642-54.

Francis, Peter et al. 2017. « Measurement of Muscle Health in Aging ». *Biogerontology* 18(6): 901-11.

Freckleton, Grant, et Tania Pizzari. 2013. « Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 47(6): 351-58.

- Fried, T., et G. J. Lloyd. 1992. « An Overview of Common Soccer Injuries. Management and Prevention ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 14(4): 269-75.
- Frouin, Antoine et al. 2023. « Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes ». *Ultrasound in Medicine & Biology*: S0301-5629(23)00064-9.
- Fukunaga, T. et al. 2001. « Muscle Volume Is a Major Determinant of Joint Torque in Humans ». *Acta Physiologica Scandinavica* 172(4): 249-55.
- Gabbe, B. J. et al. 2006. « Predictors of Hamstring Injury at the Elite Level of Australian Football ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 16(1): 7-13.
- Geirsson, R. T., A. D. Christie, et N. Patel. 1982a. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- . 1982b. « Ultrasound Volume Measurements Comparing a Prolate Ellipsoid Method with a Parallel Planimetric Area Method against a Known Volume ». *Journal of clinical ultrasound: JCU* 10(7): 329-32.
- Gibbs, N. J., T. M. Cross, M. Cameron, et M. T. Houang. 2004. « The Accuracy of MRI in Predicting Recovery and Recurrence of Acute Grade One Hamstring Muscle Strains within the Same Season in Australian Rules Football Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 7(2): 248-58.
- Gibby, Wendell A. 2005. « Basic Principles of Magnetic Resonance Imaging ». *Neurosurgery Clinics of North America* 16(1): 1-64.
- Gouttebauge, Vincent, Brendan A. Hughes Schwab, Adam Vivian, et Gino M M J Kerkhoffs. 2016. « Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(1): e31385.
- Grange, Sylvain et al. 2022. « Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review ». *Sports Health*: 19417381211071010.
- Gray, Calum et al. 2011. « Magnetic Resonance Imaging with K-Means Clustering Objectively Measures Whole Muscle Volume Compartments in Sarcopenia/Cancer Cachexia ». *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)* 30(1): 106-11.
- Gronwald, Thomas et al. 2022. « Hamstring Injury Patterns in Professional Male Football (Soccer): A Systematic Video Analysis of 52 Cases ». *British Journal of Sports Medicine* 56(3): 165-71.
- Guerini, Henri et al. 2015. « Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 19(4): 335-47.

- Guillodo, Yannick et al. 2014. « Clinical Predictors of Time to Return to Competition Following Hamstring Injuries ». *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 4(3): 386-90.
- Häggglund, M., M. Waldén, et J. Ekstrand. 2006. « Previous Injury as a Risk Factor for Injury in Elite Football: A Prospective Study over Two Consecutive Seasons ». *British Journal of Sports Medicine* 40(9): 767-72.
- Häggglund, Martin et al. 2013. « Injuries Affect Team Performance Negatively in Professional Football: An 11-Year Follow-up of the UEFA Champions League Injury Study ». *British Journal of Sports Medicine* 47(12): 738-42.
- Hallén, Anna, et Jan Ekstrand. 2014. « Return to Play Following Muscle Injuries in Professional Footballers ». *Journal of Sports Sciences* 32(13): 1229-36.
- Hamilton, B. et al. 2014. « Excellent Reliability for MRI Grading and Prognostic Parameters in Acute Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1385-87.
- Hamilton, Bruce et al. 2018. « Cohen's MRI Scoring System Has Limited Value in Predicting Return to Play ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 26(4): 1288-94.
- Hayden, Jill A., Pierre Côté, et Claire Bombardier. 2006. « Evaluation of the Quality of Prognosis Studies in Systematic Reviews ». *Annals of Internal Medicine* 144(6): 427-37.
- Hegyí, A., A. Péter, T. Finni, et N. J. Cronin. 2018. « Region-Dependent Hamstrings Activity in Nordic Hamstring Exercise and Stiff-Leg Deadlift Defined with High-Density Electromyography ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 28(3): 992-1000.
- van Heumen, Moniek et al. 2017. « The Prognostic Value of MRI in Determining Reinjury Risk Following Acute Hamstring Injury: A Systematic Review ». *British Journal of Sports Medicine* 51(18): 1355-63.
- Hickey, Jack, Anthony J. Shield, Morgan D. Williams, et David A. Opar. 2014a. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- . 2014b. « The Financial Cost of Hamstring Strain Injuries in the Australian Football League ». *British Journal of Sports Medicine* 48(8): 729-30.
- Hickey, Jack T., David A. Opar, Leigh J. Weiss, et Bryan C. Heiderscheit. 2022. « Hamstring Strain Injury Rehabilitation ». *Journal of Athletic Training* 57(2): 125-35.
- Higashihara, Ayako et al. 2010. « Functional Differences in the Activity of the Hamstring Muscles with Increasing Running Speed ». *Journal of Sports Sciences* 28(10): 1085-92.

- Hioki, Maya et al. 2020a. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- . 2020b. « Age-Related Changes in Muscle Volume and Intramuscular Fat Content in Quadriceps Femoris and Hamstrings ». *Experimental Gerontology* 132: 110834.
- Hogrel, Jean-Yves et al. 2015. « NMR Imaging Estimates of Muscle Volume and Intramuscular Fat Infiltration in the Thigh: Variations with Muscle, Gender, and Age ». *Age (Dordrecht, Netherlands)* 37(3): 9798.
- Islam, S. et al. 2022. « Fully Automated Deep-Learning Section-Based Muscle Segmentation from CT Images for Sarcopenia Assessment ». *Clinical Radiology* 77(5): e363-71.
- Iversen, Erik, Vibeke Røstad, et Arne Larmo. 2016. « Intermittent Blood Flow Restriction Does Not Reduce Atrophy Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Journal of Sport and Health Science* 5(1): 115-18.
- Jacobsen, Phil et al. 2016. « A Combination of Initial and Follow-up Physiotherapist Examination Predicts Physician-Determined Time to Return to Play after Hamstring Injury, with No Added Value of MRI ». *British Journal of Sports Medicine* 50(7): 431-39.
- Kemnitz, Jana et al. 2020. « Clinical Evaluation of Fully Automated Thigh Muscle and Adipose Tissue Segmentation Using a U-Net Deep Learning Architecture in Context of Osteoarthritic Knee Pain ». *Magma (New York, N.Y.)* 33(4): 483-93.
- Kenneally-Dabrowski, Claire J. B. et al. 2019. « Late Swing or Early Stance? A Narrative Review of Hamstring Injury Mechanisms during High-Speed Running ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 29(8): 1083-91.
- Kilroe, Sean P. et al. 2020a. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- . 2020b. « Temporal Muscle-Specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 52(4): 944-54.
- Koulouris, George, et David Connell. 2003. « Evaluation of the Hamstring Muscle Complex Following Acute Injury ». *Skeletal Radiology* 32(10): 582-89.
- . 2005. « Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review ». *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc* 25(3): 571-86.
- Koulouris, George, David A. Connell, Peter Brukner, et Michal Schneider-Kolsky. 2007. « Magnetic Resonance Imaging Parameters for Assessing Risk of Recurrent Hamstring Injuries in Elite Athletes ». *The American Journal of Sports Medicine* 35(9): 1500-1506.

- Kulas, Anthony S. et al. 2018. « Bilateral Quadriceps and Hamstrings Muscle Volume Asymmetries in Healthy Individuals ». *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 36(3): 963-70.
- Kumazaki, T., Y. Ehara, et T. Sakai. 2012. « Anatomy and Physiology of Hamstring Injury ». *International Journal of Sports Medicine* 33(12): 950-54.
- Le Troter, Arnaud et al. 2016. « Volume Measurements of Individual Muscles in Human Quadriceps Femoris Using Atlas-Based Segmentation Approaches ». *Magma (New York, N.Y.)* 29(2): 245-57.
- Lemes, Italo Ribeiro et al. 2021. « Do Exercise-Based Prevention Programmes Reduce Non-Contact Musculoskeletal Injuries in Football (Soccer)? A Systematic Review and Meta-Analysis with 13 355 Athletes and More than 1 Million Exposure Hours ». *British Journal of Sports Medicine* 55(20): 1170-78.
- Linklater, James M. et al. 2010. « Hamstring Injuries: Anatomy, Imaging, and Intervention ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology* 14(2): 131-61.
- Lins, Carolina Freitas, Carlos Ernesto Garrido Salmon, et Marcello Henrique Nogueira-Barbosa. 2021. « Applications of the Dixon Technique in the Evaluation of the Musculoskeletal System ». *Radiologia Brasileira* 54(1): 33-42.
- Liu, Jia, Kristi L. Lewton, Patrick M. Colletti, et Christopher M. Powers. 2021. « Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(11): 2346-53.
- Louis, Luck J. 2008. « Musculoskeletal Ultrasound Intervention: Principles and Advances ». *Radiologic Clinics of North America* 46(3): 515-33, vi.
- Macdonald, Ben et al. 2019. « Hamstring Rehabilitation in Elite Track and Field Athletes: Applying the British Athletics Muscle Injury Classification in Clinical Practice ». *British Journal of Sports Medicine* 53(23): 1464-73.
- Mack, Christina D. et al. 2020. « Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018 ». *The American Journal of Sports Medicine* 48(9): 2287-94.
- Mackey, Abigail L., et Michael Kjaer. 2017. « The Breaking and Making of Healthy Adult Human Skeletal Muscle in Vivo ». *Skeletal Muscle* 7(1): 24.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Gustaaf Reurink, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Injury Is Not Associated with an Increased Hamstring Reinjury Rate within 12 Months after Return to Play ». *British Journal of Sports Medicine* 52(19): 1261-66.
- van der Made, Anne D., Emad Almusa, Rod Whiteley, et al. 2018. « Intramuscular Tendon Involvement on MRI Has Limited Value for Predicting Time to Return to Play Following Acute Hamstring Injury ». *British Journal of Sports Medicine* 52(2): 83-88.

- Mallinson, Joanne E. et al. 2020. « Longitudinal Hypertrophic and Transcriptional Responses to High-Load Eccentric-Concentric vs Concentric Training in Males ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 30(11): 2101-15.
- Mandić, Mirko et al. 2020. « Automated Assessment of Regional Muscle Volume and Hypertrophy Using MRI ». *Scientific Reports* 10(1): 2239.
- McCormick, Matthew et al. 2014. « ITK: Enabling Reproducible Research and Open Science ». *Frontiers in Neuroinformatics* 8: 13.
- Mendez-Villanueva, Alberto et al. 2016. « MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players ». *PloS One* 11(9): e0161356.
- Mendiguchia, Jurdan et al. 2017. « A Multifactorial, Criteria-Based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 49(7): 1482-92.
- Mense, Siegfried. 2003. « The Pathogenesis of Muscle Pain ». *Current Pain and Headache Reports* 7(6): 419-25.
- Millan, M. J. 1999. « The Induction of Pain: An Integrative Review ». *Progress in Neurobiology* 57(1): 1-164.
- Moher, D., B. Pham, M. L. Lawson, et T. P. Klassen. 2003. « The Inclusion of Reports of Randomised Trials Published in Languages Other than English in Systematic Reviews ». *Health Technology Assessment (Winchester, England)* 7(41): 1-90.
- Monti, Elena et al. 2020. « The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training ». *Frontiers in Physiology* 11: 946.
- Morin, Jean-Benoît et al. 2015. « Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production ». *Frontiers in Physiology* 6: 404.
- Morse, Christopher I., Hans Degens, et David A. Jones. 2007. « The Validity of Estimating Quadriceps Volume from Single MRI Cross-Sections in Young Men ». *European Journal of Applied Physiology* 100(3): 267-74.
- Mühlenfeld, Nils et al. 2021. « Assessment of Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Football Players after Hamstring Injuries ». *European Journal of Sport Science*: 1-9.
- Nescolarde, L. et al. 2015. « Effects of Muscle Injury Severity on Localized Bioimpedance Measurements ». *Physiological Measurement* 36(1): 27-42.
- Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. 2019. « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI) ». *Journal de Traumatologie du Sport*.

- Nguyen, Hoai-Thu et al. 2021. « Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 53(4): 869-81.
- Nordez, Antoine et al. 2009. « Comparison of Methods to Assess Quadriceps Muscle Volume Using Magnetic Resonance Imaging ». *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI* 30(5): 1116-23.
- Nuell, Sergi et al. 2019a. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PLoS One* 14(11): e0224862.
- . 2019b. « Sex Differences in Thigh Muscle Volumes, Sprint Performance and Mechanical Properties in National-Level Sprinters ». *PLoS One* 14(11): e0224862.
- Opar, David A. et al. 2015. « The Effect of Previous Hamstring Strain Injuries on the Change in Eccentric Hamstring Strength during Preseason Training in Elite Australian Footballers ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(2): 377-84.
- Orchard, J., et H. Seward. 2002. « Epidemiology of Injuries in the Australian Football League, Seasons 1997-2000 ». *British Journal of Sports Medicine* 36(1): 39-44.
- O'Sullivan, Lucy, Jamie Preszler, et Miho Tanaka. 2022. « Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 17(6): 1184-93.
- Panisset, Maya G. et al. 2020. « Factors Influencing Thigh Muscle Volume Change with Cycling Exercises in Acute Spinal Cord Injury - a Secondary Analysis of a Randomized Controlled Trial ». *The Journal of Spinal Cord Medicine*: 1-12.
- Patel, A. et al. 2015. « British Athletics Muscle Injury Classification: A Reliability Study for a New Grading System ». *Clinical Radiology* 70(12): 1414-20.
- Paton, Bruce M. et al. 2023. « London International Consensus and Delphi Study on Hamstring Injuries Part 1: Classification ». *British Journal of Sports Medicine*: bjsports-2021-105371.
- Peetrons, P. 2002a. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- . 2002b. « Ultrasound of Muscles ». *European Radiology* 12(1): 35-43.
- Pieters, Dries, Evi Wezenbeek, Joke Schuermans, et Erik Witvrouw. 2021. « Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It Is Time to Consider Natural Healing ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 51(10): 2067-77.
- Pollock, Noel et al. 2016a. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.

- . 2016b. « Time to Return to Full Training Is Delayed and Recurrence Rate Is Higher in Intratendinous ('c') Acute Hamstring Injury in Elite Track and Field Athletes: Clinical Application of the British Athletics Muscle Injury Classification ». *British Journal of Sports Medicine* 50(5): 305-10.
- . 2021. « A 4-Year Study of Hamstring Injury Outcomes in Elite Track and Field Using the British Athletics Rehabilitation Approach ». *British Journal of Sports Medicine*.
- Pollock, Noel, Steven L. J. James, Justin C. Lee, et Robin Chakraverty. 2014a. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- . 2014b. « British Athletics Muscle Injury Classification: A New Grading System ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1347-51.
- Pomeranz, S. J., et R. S. Heidt. 1993. « MR Imaging in the Prognostication of Hamstring Injury. Work in Progress ». *Radiology* 189(3): 897-900.
- Pons, Christelle et al. 2018. « Quantifying Skeletal Muscle Volume and Shape in Humans Using MRI: A Systematic Review of Validity and Reliability ». *PloS One* 13(11): e0207847.
- Rees, Huw et al. 2021. « The Burden of Injury in Field Hockey: A Secondary Analysis of Prospective Cohort Data ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 31(4): 884-93.
- Rettig, Arthur C., Susan Meyer, et Arup K. Bhadra. 2013a. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- . 2013b. « Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play ». *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 1(1): 2325967113494354.
- Reurink, G., R. Whiteley, et J. L. Tol. 2015. « Hamstring Injuries and Predicting Return to Play: “Bye-Bye MRI?” ». *British Journal of Sports Medicine* 49(18): 1162-63.
- Reurink, Gustaaf et al. 2014. « MRI Observations at Return to Play of Clinically Recovered Hamstring Injuries ». *British Journal of Sports Medicine* 48(18): 1370-76.
- Reurink, Gustaaf, Elisabeth G. Brilman, et al. 2015. « Magnetic Resonance Imaging in Acute Hamstring Injury: Can We Provide a Return to Play Prognosis? ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45(1): 133-46.
- Reurink, Gustaaf, Emad Almusa, et al. 2015. « No Association between Fibrosis on Magnetic Resonance Imaging at Return to Play and Hamstring Reinjury Risk ». *The American Journal of Sports Medicine* 43(5): 1228-34.

- Rubin, David A. 2012. « Imaging Diagnosis and Prognostication of Hamstring Injuries ». *AJR. American journal of roentgenology* 199(3): 525-33.
- Rush, Justin L., Grant E. Norte, et Adam S. Lepley. 2020. « Limb Differences in Hamstring Muscle Function and Morphology after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction ». *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 45: 168-75.
- Safar Cherati, Afsaneh et al. 2016. « The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and Its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites ». *Asian Journal of Sports Medicine* 7(3): e35289.
- Schache, Anthony G. et al. 2012. « Mechanics of the Human Hamstring Muscles during Sprinting ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(4): 647-58.
- Schneider-Kolsky, Michal E., Jan Lucas Hoving, Price Warren, et David A. Connell. 2006. « A Comparison between Clinical Assessment and Magnetic Resonance Imaging of Acute Hamstring Injuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 34(6): 1008-15.
- Sciascia, Aaron, Jacob Waldecker, et Cale Jacobs. 2020. « Pain Catastrophizing in College Athletes ». *Journal of Sport Rehabilitation* 29(2): 168-73.
- Shield, Anthony J., et Matthew N. Bourne. 2018. « Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 48(3): 513-24.
- Silder, Amy et al. 2013. « Clinical and Morphological Changes Following 2 Rehabilitation Programs for Acute Hamstring Strain Injuries: A Randomized Clinical Trial ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 43(5): 284-99.
- Slavotinek, John P., Geoffrey M. Verrall, et Gerald T. Fon. 2002. « Hamstring Injury in Athletes: Using MR Imaging Measurements to Compare Extent of Muscle Injury with Amount of Time Lost from Competition ». *AJR. American journal of roentgenology* 179(6): 1621-28.
- Söderman, K., H. Alfredson, T. Pietilä, et S. Werner. 2001. « Risk Factors for Leg Injuries in Female Soccer Players: A Prospective Investigation during One out-Door Season ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 9(5): 313-21.
- Souza, Jaqueline de, et Carmem Gottfried. 2013. « Muscle Injury: Review of Experimental Models ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 23(6): 1253-60.
- Speer, K. P., J. Lohnes, et W. E. Garrett. 1993. « Radiographic Imaging of Muscle Strain Injury ». *The American Journal of Sports Medicine* 21(1): 89-95; discussion 96.

- Sprague, Andrew L. et al. 2018. « Modifiable Risk Factors for Patellar Tendinopathy in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 52(24): 1575-85.
- Stępień, Karolina et al. 2019. « Anatomy of Proximal Attachment, Course, and Innervation of Hamstring Muscles: A Pictorial Essay ». *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 27(3): 673-84.
- Tate, Christine Marie, Glenn N. Williams, Peter J. Barrance, et Thomas S. Buchanan. 2006. « Lower Extremity Muscle Morphology in Young Athletes: An MRI-Based Analysis ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(1): 122-28.
- Timmins, Ryan G. et al. 2016. « Short Biceps Femoris Fascicles and Eccentric Knee Flexor Weakness Increase the Risk of Hamstring Injury in Elite Football (Soccer): A Prospective Cohort Study ». *British Journal of Sports Medicine* 50(24): 1524-35.
- Torğutalp, Şerife Şeyma et al. 2021. « Volume and T2 Relaxation Time Measurements of Quadriceps Femoris and Hamstring Muscles Are Reliable and Reproducible ». *Turkish Journal of Medical Sciences* 51(4): 2007-14.
- Trappe, T. A., D. M. Lindquist, et J. A. Carrithers. 2001a. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- . 2001b. « Muscle-Specific Atrophy of the Quadriceps Femoris with Aging ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 90(6): 2070-74.
- Verrall, G. M. et al. 2001. « Clinical Risk Factors for Hamstring Muscle Strain Injury: A Prospective Study with Correlation of Injury by Magnetic Resonance Imaging ». *British Journal of Sports Medicine* 35(6): 435-39; discussion 440.
- Verrall, G. M., Y. Kalairajah, J. P. Slavotinek, et A. J. Spriggins. 2006. « Assessment of Player Performance Following Return to Sport after Hamstring Muscle Strain Injury ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 9(1-2): 87-90.
- Verrall, Geoffrey M. et al. 2006. « Assessment of Physical Examination and Magnetic Resonance Imaging Findings of Hamstring Injury as Predictors for Recurrent Injury ». *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 36(4): 215-24.
- Verrall, Geoffrey M., John P. Slavotinek, Peter G. Barnes, et Gerald T. Fon. 2003. « Diagnostic and Prognostic Value of Clinical Findings in 83 Athletes with Posterior Thigh Injury: Comparison of Clinical Findings with Magnetic Resonance Imaging Documentation of Hamstring Muscle Strain ». *The American Journal of Sports Medicine* 31(6): 969-73.
- Vivodtzev, Isabelle et al. 2018. « Quadriceps Muscle Fat Infiltration Is Associated with Cardiometabolic Risk in COPD ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 38(5): 788-97.

- Walsh, Meghan et al. 2012. « Lower Extremity Muscle Activation and Knee Flexion during a Jump-Landing Task ». *Journal of Athletic Training* 47(4): 406-13.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2015. « MRI Does Not Add Value over and above Patient History and Clinical Examination in Predicting Time to Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Cohort of 180 Male Athletes ». *British Journal of Sports Medicine* 49(24): 1579-87.
- . 2016. « Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries ». *The American Journal of Sports Medicine* 44(8): 2112-21.
- Wangenstein, Arnlaug, Johannes L. Tol, et al. 2017. « Intra- and Interrater Reliability of Three Different MRI Grading and Classification Systems after Acute Hamstring Injuries ». *European Journal of Radiology* 89: 182-90.
- Wangenstein, Arnlaug, Roald Bahr, et al. 2017. « MRI Appearance Does Not Change in the First 7 Days after Acute Hamstring Injury-a Prospective Study ». *British Journal of Sports Medicine* 51(14): 1087-92.
- Wangenstein, Arnlaug et al. 2018. « New MRI Muscle Classification Systems and Associations with Return to Sport after Acute Hamstring Injuries: A Prospective Study ». *European Radiology* 28(8): 3532-41.
- Weber, Kenneth A. et al. 2019. « Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury ». *Scientific Reports* 9(1): 7973.
- Williams, Sean, Grant Trewartha, Simon Kemp, et Keith Stokes. 2013. « A Meta-Analysis of Injuries in Senior Men's Professional Rugby Union ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 43(10): 1043-55.
- Williamson, Amelia, et Barbara Hoggart. 2005. « Pain: A Review of Three Commonly Used Pain Rating Scales ». *Journal of Clinical Nursing* 14(7): 798-804.
- Woods, C. et al. 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.
- Wu, Y. F. et al. 2021. « [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging] ». *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 53(5): 843-49.
- Yamauchi, Koun, Chisato Kato, et Takayuki Kato. 2019. « Characteristics of Individual Thigh Muscles Including Cross-Sectional Area and Adipose Tissue Content Measured by Magnetic Resonance Imaging in Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study ». *Rheumatology International* 39(4): 679-87.

Yang, Zepa et al. 2023. « Deep Learning-Based Pectoralis Muscle Volume Segmentation Method from Chest Computed Tomography Image Using Sagittal Range Detection and Axial Slice-Based Segmentation ». *PloS One* 18(9): e0290950.

FIGURES

Figure 1

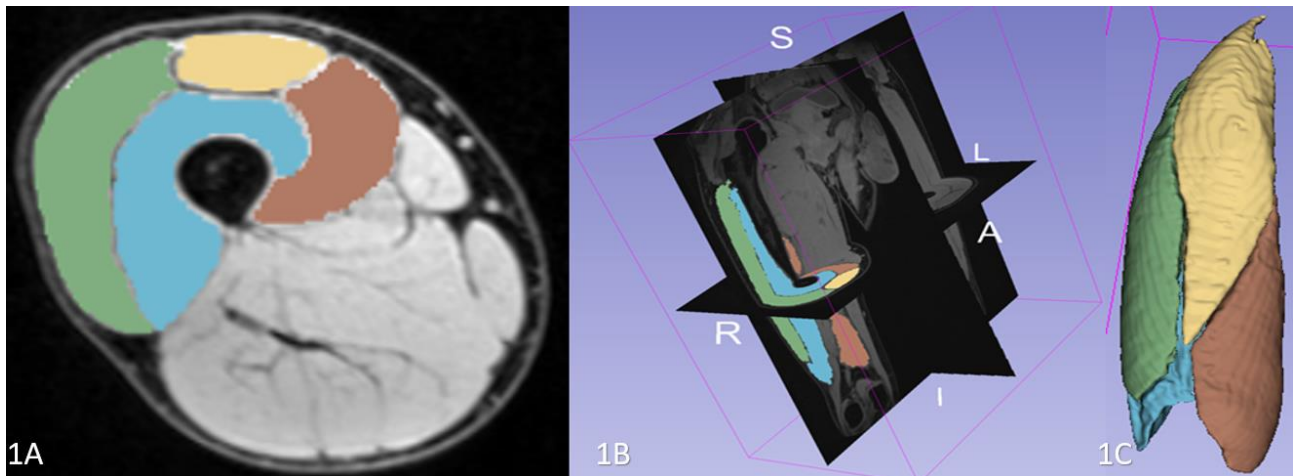


Figure 1: Quadriceps Femoris segmentation. Segmentations were made with 3D Slicer software. The first image (1A) represents the quadriceps muscle in MR resliced axial view on T1 DIXON image, segmented separately on each muscle: Rectus Femoris (yellow); Vastus Intermedius (blue); Vastus Lateralis (green); Vastus Medialis (red). The second image (1B) represents 3D isotropic gradient dual-echo sequences with reconstruction in water images included the entire upper leg, representing in coronal and axial from the tuberosity to the anterior superior iliac spine. The third image (1C) illustrates the 3D representation with each quadriceps muscle head segmented. The same process was used for the hamstrings.

Figure 2

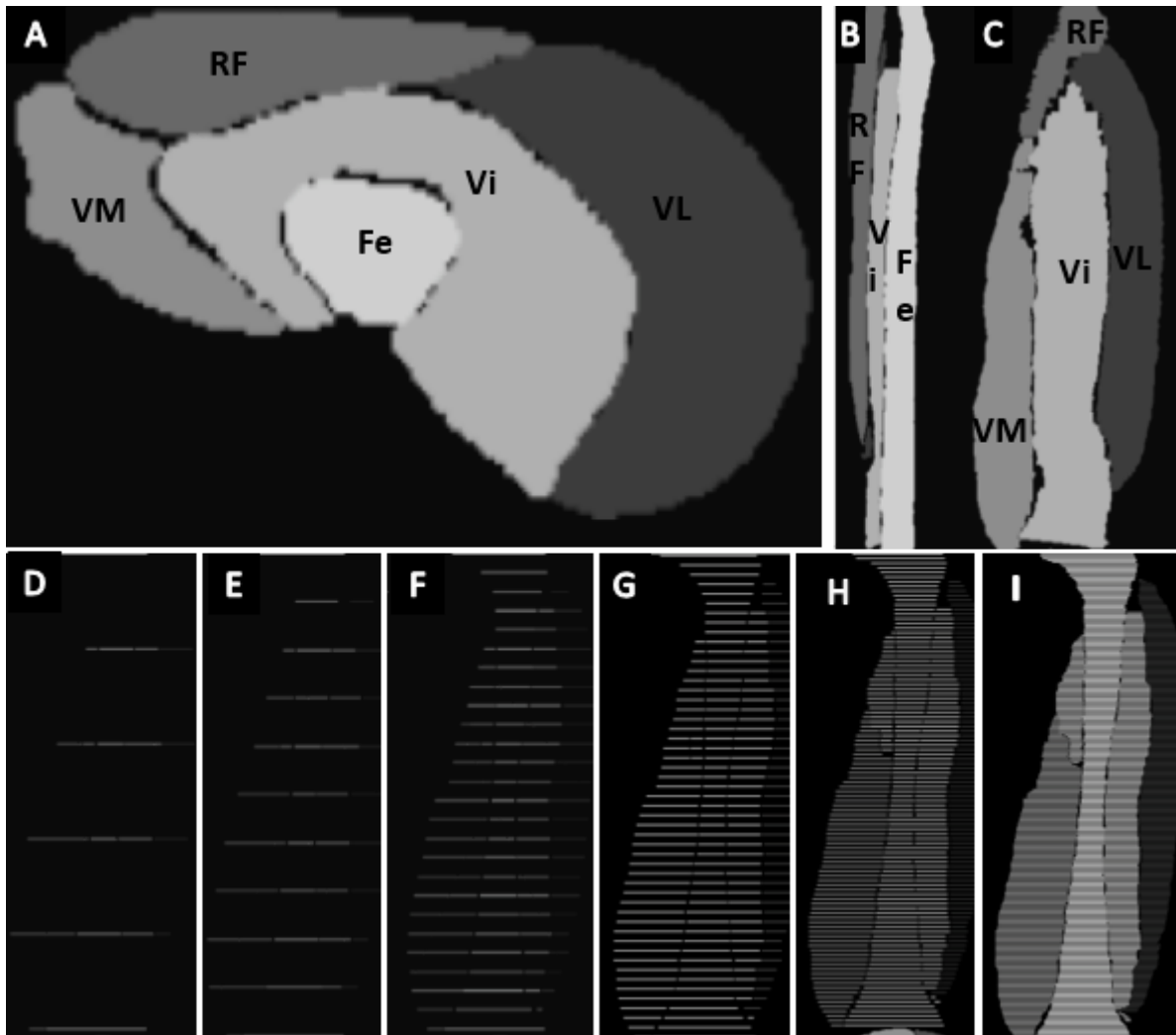


Figure 2: Building the undersampled datasets of the quadriceps muscles and each of the muscle heads. Example of obtained reference (A, B, C) and sparse MRI datasets (D, E, F, G, H, I) with progressively decreased number of segmented slices corresponding scenario.

Each quadriceps slice was manually segmented into Vastus Lateralis (VL), Vastus Intermedius (Vi), Vastus Medialis (VM), and Rectus Femoris (RF). The femur is also represented (Fe).

Selection of expert segmentation masks in axial slice (A), sagittal (B) and coronal (C) views and the tested sparsed segmentations corresponding to 1% (D), 2%(E), 5%(F), 10%(G), 20%(H), and 50%(I) of the axial slices displayed in coronal views. The same process was used for the hamstrings.

Figure 3

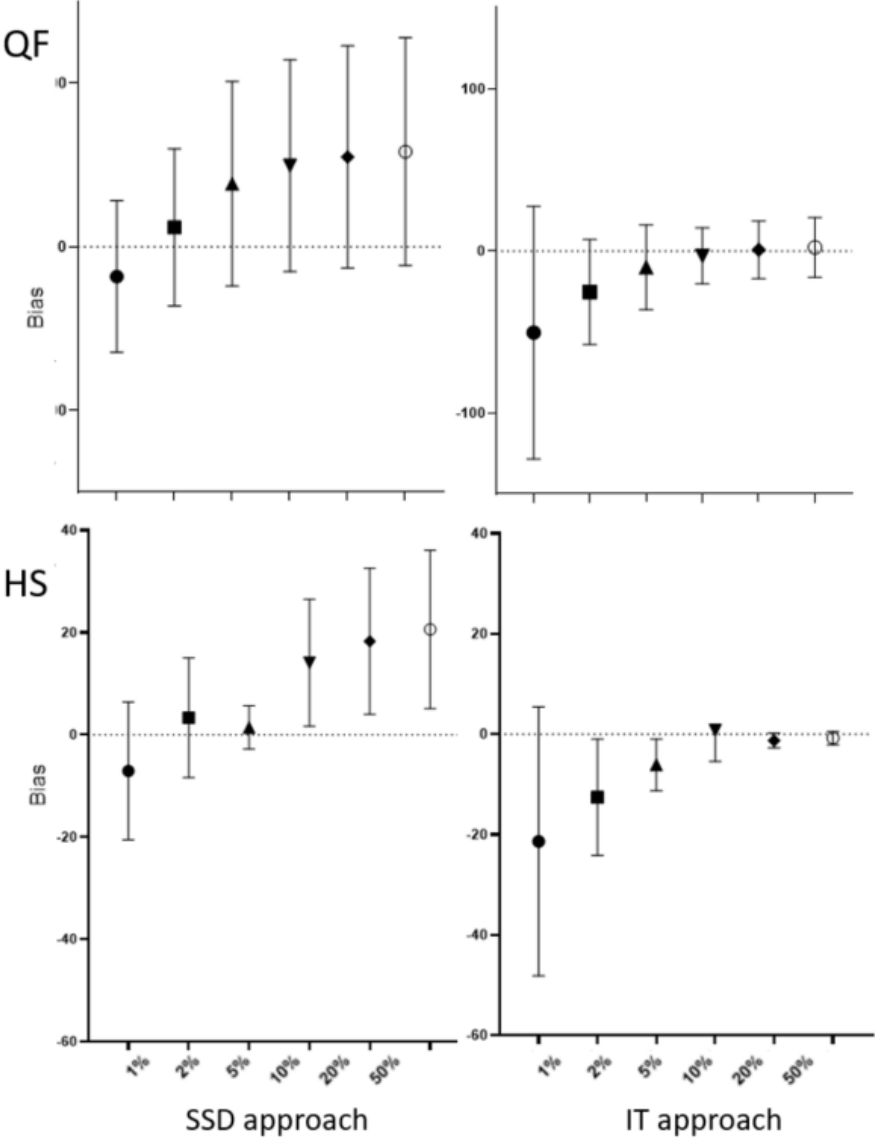


Figure 3: Representation of the bias of the QF and the HS, for the two methods, compared to the reference.

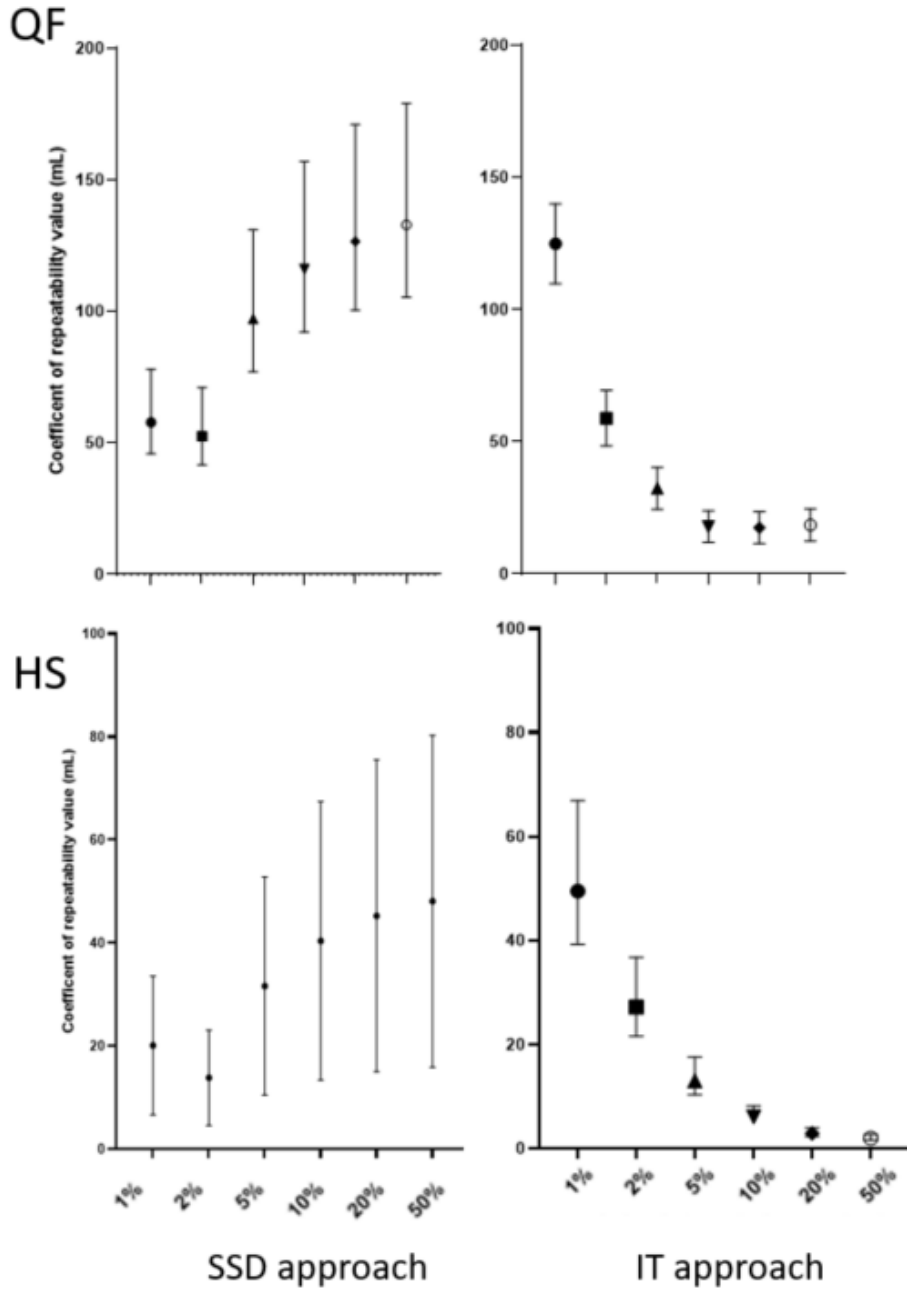


Figure 4. Representation of the coefficient of repeatability (CR) of the QF and the HS, for the two methods, compared to the reference. The CR is expressed in mL.

Figure 5

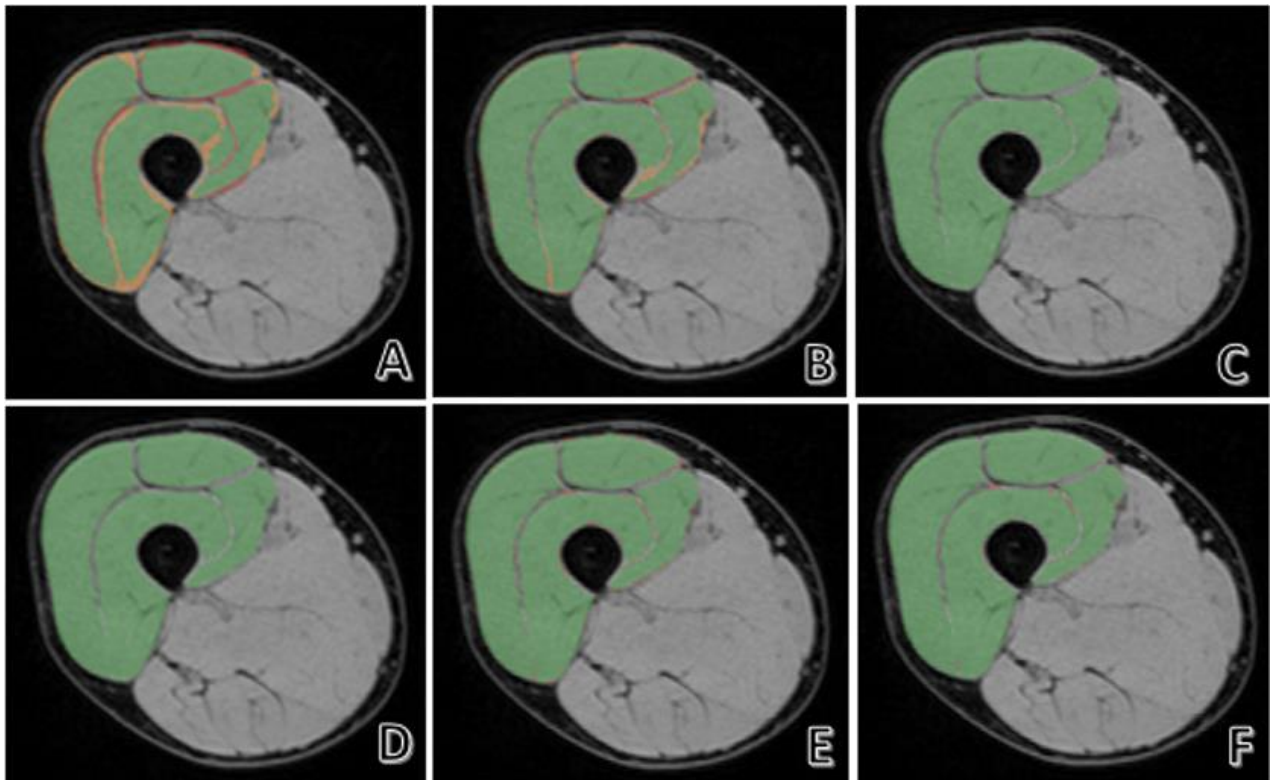


Figure 5: Axial views representation resliced of the segmentations produced using sparsely segmented datasets and interpolation, for one subject. A section is shown at the same thigh level, for all atlases, based on 1% sub-sampling of sections (A), 2%(B), 5%(C), 10%(D), 20% (E), 50%(F). Pixels in agreement are shown in green, areas of over-segmentation relative to the reference are shown in red, and areas of under-segmentation in orange. It can be seen that areas of discordance are mainly visible at 1 and 2%, and become more difficult to detect at 5% and above. Areas of over-segmentation correspond essentially to intermuscular fascia, and at a minimum to peri-muscular fascia (e.g. in front of the rectus femoris). Areas of sub-segmentation generally correspond to the muscle periphery, in contact with the fascia (e.g. posterior part of the vastus intermedius), but also to a few intramuscular zones, but only at 1% and 2%.

Supplementary Data

Supplementary Data 1.

Subject	Sexe (M/F)	Age	Poids (kg)	Taille (cm)	IMC
1	M	43	70,7	171	24,2
2	M	32	65,7	180	20,3
3	M	74	84,3	178	26,6
4	M	34	66,5	170	23,0
5	F	50	56	166	20,3
6	M	48	71,2	179	22,2
7	M	34	78,7	180	24,3
Mean		45	70	175	23
SD		15	9	6	2

Supplementary Data 1. Demographic data of the subject population, for the quadriceps femoris (QF)(1a) and the Hamstring (HS)(1b).

Subject	Sexe (M/F)	Age	Poids (kg)	Taille (cm)	IMC
1	M	43	70,7	171	24,2
2	M	32	65,7	180	20,3
3	M	74	84,3	178	26,6
4	M	34	66,5	170	23,0
5	F	50	56	166	20,3
6	M	40	69,2	176	22,3
7	M	40	72,3	174	23,9
Mean		45	69	174	23
SD		14	9	5	2

Supplementary Data 1b. Demographic data of the HS population

Supplementary Data 2.

Subject	1		2		3		4		5		6		7		MEAN	MEAN	SD
Vol_Ref	1869,6		2434,2		2120,9		2447,5		2440,2		1322,9		2714,1		2192,8	-	469,5
	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	
IT_1%	1730,0	-7,5%	2126,8	-12,6%	1934,2	-8,8%	2227,0	-9,0%	2085,2	-14,5%	1206,3	-8,8%	2455,8	-10,4%	1966,5	-10,3%	1059,7
IT_2%	1789,1	-4,3%	2325,3	-4,5%	2031,0	-4,2%	2312,5	-5,5%	2307,4	-5,4%	1265,4	-4,3%	2578,0	-6,0%	2086,9	-5,8%	1126,8
IT_5%	1840,1	-1,6%	2397,7	-1,5%	2091,8	-1,4%	2409,7	-1,5%	2388,3	-2,1%	1293,4	-2,2%	2661,2	-2,9%	2154,6	-1,7%	1164,7
IT_10%	1855,2	-0,8%	2418,3	-0,7%	2106,1	-0,7%	2430,2	-0,7%	2420,0	-0,8%	1313,8	-0,7%	2686,9	-2,0%	2175,8	-0,8%	1175,8
IT_20%	1866,3	-0,2%	2430,2	-0,2%	2115,8	-0,2%	2444,3	-0,1%	2438,4	-0,1%	1319,8	-0,2%	2713,1	-1,0%	2189,7	-0,1%	1183,8
IT_50%	1870,4	0,0%	2433,9	0,0%	2122,5	0,1%	2450,9	0,1%	2444,4	0,2%	1323,3	0,0%	2719,4	-0,8%	2195,0	0,1%	1186,6
SSD_1%	1766,5	-5,5%	2222,6	-8,7%	2070,1	-2,4%	2322,1	-5,1%	2389,4	-2,1%	1313,0	-0,8%	2685,2	-2,0%	2109,8	-3,8%	1140,3
SSD_2%	1872,8	0,2%	2386,0	-2,0%	2169,7	2,3%	2442,6	-0,2%	2608,9	6,9%	1387,9	4,9%	2823,4	3,0%	2241,6	2,2%	1212,4
SSD_5%	1956,1	4,6%	2494,2	2,5%	2275,1	7,3%	2566,5	4,9%	2766,7	13,4%	1441,6	9,0%	2963,7	8,1%	2352,0	7,3%	1273,9
SSD_10%	1989,2	6,4%	2532,9	4,1%	2313,2	9,1%	2605,1	6,4%	2817,3	15,5%	1472,1	11,3%	3011,0	9,8%	2391,5	9,1%	1294,9
SSD_20%	2004,0	7,2%	2552,1	4,8%	2327,9	9,8%	2631,4	7,5%	2846,2	16,6%	1484,1	12,2%	3036,2	10,8%	2411,7	10,0%	1306,1
SSD_50%	2013,7	7,7%	2564,4	5,3%	2341,4	10,4%	2641,4	7,9%	2859,7	17,2%	1492,3	12,8%	3051,9	11,3%	2423,5	10,5%	1312,4

Supplementary Data 2. Quadriceps Femoris (QF) volume estimation with the both methods.

Absolute (abs) and relative(rel) difference between QF volume (vol) reference (ref), spaced sliced without (Sparsed Segmented Datasets, SSD) or with interpolation (IT). Absolute volume in cm³. Sparsed segmentations are based on 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% of slices.

Supplementary Data 3.

Subject	1		2		3		4		5		6		7		MEAN	MEAN	SD
Vol_Ref	898,5		870,2		965,5		1001,6		919,5		611,8		965,8		874,7	-	192,4
	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	Abs	Rel	
IT_1%	782,9	-12,9%	768,7	-11,7%	876,5	-9,2%	919,6	-8,2%	832,4	-9,5%	537,4	-12,2%	857,9	-11,2%	796,5	-8,9%	125,6
IT_2%	844,2	-6,0%	820,7	-5,7%	921,3	-4,6%	952,1	-4,9%	874,0	-4,9%	571,9	-6,5%	916,7	-5,1%	843,0	-3,6%	128,1
IT_5%	871,5	-3,0%	846,6	-2,7%	941,5	-2,5%	977,5	-2,4%	893,6	-2,8%	596,9	-2,4%	944,9	-2,2%	867,5	-0,8%	127,7
IT_10%	886,6	-1,3%	861,1	-1,0%	955,8	-1,0%	988,5	-1,3%	909,1	-1,1%	604,6	-1,2%	953,6	-1,3%	879,9	0,6%	129,1
IT_20%	892,1	-0,7%	865,4	-0,5%	961,6	-0,4%	997,7	-0,4%	913,7	-0,6%	606,2	-0,9%	962,8	-0,3%	885,6	1,3%	131,4
IT_50%	893,4	-0,6%	867,0	-0,4%	963,4	-0,2%	1001,1	-0,1%	915,1	-0,5%	607,7	-0,7%	964,4	-0,1%	887,4	1,5%	131,7
SSD_1%	889,1	-1,0%	865,5	-0,5%	908,1	-5,9%	960,5	-4,1%	873,0	-5,1%	601,7	-1,7%	939,0	-2,8%	862,4	-1,4%	120,0
SSD_2%	939,8	4,6%	902,2	3,7%	969,0	0,4%	994,0	-0,8%	914,7	-0,5%	623,7	1,9%	998,7	3,4%	906,0	3,6%	129,9
SSD_5%	984,1	9,5%	942,1	8,3%	1008,0	4,4%	1046,7	4,5%	960,5	4,5%	659,5	7,8%	1044,6	8,2%	949,3	8,6%	133,8
SSD_10%	1001,7	11,5%	959,4	10,3%	1022,7	5,9%	1061,5	6,0%	976,0	6,1%	670,1	9,5%	1058,4	9,6%	964,3	10,3%	135,3
SSD_20%	1011,3	12,6%	967,5	11,2%	1031,2	6,8%	1071,8	7,0%	985,0	7,1%	676,3	10,5%	1069,3	10,7%	973,2	11,3%	136,7
SSD_50%	1016,4	13,1%	972,0	11,7%	1037,1	7,4%	1077,9	7,6%	990,4	7,7%	679,8	11,1%	1073,8	11,2%	978,2	11,9%	137,4

Supplementary Data 3: Hamstring (HS) volume estimation with the both methods. Absolute (abs) and relative (rel) difference between HS volume reference, spaced sliced without (Sparsed Segmented Datasets, SSD) or with interpolation (IT). Absolute volume in cm³. Sparsed segmentations are based on 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% of slices.

Supplementary Data 4.

Supplementary Data 4a.

	SSD1%			SSD2%			SSD5%			SSD10%			SSD20%			SSD50%		
	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA
QF	-18,21	-64,53	28,12	11,80	-36,25	59,86	38,44	-24,00	100,89	49,57	-15,22	114,37	54,93	-12,95	122,80	58,14	-11,41	127,69
RF	-11,70	-35,84	12,43	3,01	-14,20	20,22	17,47	-8,98	43,91	25,34	0,02	50,66	28,94	2,01	55,88	30,56	3,57	57,55
VI	-16,57	-71,99	38,85	24,91	-28,55	78,38	54,54	-10,23	119,30	66,08	0,94	131,23	72,43	2,99	141,86	76,06	5,77	146,35
VL	-14,34	-55,77	27,09	12,00	-48,29	72,29	46,22	-25,33	117,77	61,31	-7,71	130,34	68,49	-1,28	138,26	73,41	3,16	143,66
VM	-30,22	-88,27	27,83	7,29	-41,63	56,21	35,55	-28,43	99,53	45,56	-23,00	114,12	49,84	-20,73	120,42	52,54	-19,09	124,16
HS	-7,08	-20,55	6,40	3,32	-8,36	15,01	1,42	-2,81	5,65	14,07	1,64	26,51	18,30	4,01	32,58	20,60	5,13	36,08
BL	-7,84	-19,44	3,76	2,04	-9,60	13,68	13,09	4,18	22,00	18,74	10,57	26,91	21,40	12,15	30,66	22,73	13,33	32,12
BS	-9,67	-30,79	11,44	5,05	-10,41	20,50	18,42	6,60	30,24	23,39	8,72	38,05	26,09	11,42	40,76	27,78	12,77	42,80
SM	-4,01	-10,00	1,97	1,61	-2,19	5,40	7,77	1,89	13,64	10,08	3,62	16,53	11,18	3,77	18,59	11,62	4,60	18,63
ST	-6,78	-17,96	4,41	4,60	-8,99	18,19	17,02	5,35	28,68	20,99	9,06	32,92	23,74	11,84	35,65	25,54	13,57	37,51

Supplementary Data 4a. Bias results for SSD method.

Supplementary Data 4b.

	IT1%			IT2%			IT5%			IT10%			IT20%			IT50%		
	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA	BIAS	LLOA	ULOA
QF	-50,35	-128,31	27,62	-25,31	-57,67	7,05	-10,06	-36,25	16,13	-2,99	-20,23	14,24	0,71	-17,06	18,48	2,19	-16,18	20,56
RF	-26,83	-104,76	51,11	-17,53	-51,37	16,31	-8,01	-19,47	3,45	-3,20	-6,71	0,31	-1,23	-1,85	-0,62	-0,44	-1,64	0,76
VI	-77,10	-134,16	-20,04	-21,70	-34,19	-9,21	-11,65	-15,97	-7,32	-3,97	-6,17	-1,77	-0,55	-1,87	0,77	0,94	-0,42	2,31
VL	-43,11	-143,00	56,77	-40,73	-78,94	-2,52	-16,51	-55,60	22,57	-6,49	-14,76	1,78	-1,25	-5,57	3,07	0,67	-1,13	2,47
VM	-54,34	-99,62	-9,05	-21,28	-43,26	0,70	-4,08	-36,20	28,05	1,69	-31,38	34,76	5,89	-29,31	41,09	7,60	-28,91	44,10
HS	-21,38	-48,20	5,43	-12,60	-24,19	-1,02	-6,12	-11,27	-0,97	0,79	-5,43	-0,16	-1,28	-2,76	0,20	-0,76	-2,08	0,55
BL	-17,97	-61,26	25,33	-16,81	-35,30	1,67	-8,16	-15,78	-0,54	-4,19	-7,55	-0,83	-1,93	-4,14	0,27	-1,28	-2,24	-0,32
BS	-28,91	-52,95	-4,86	-12,66	-21,37	-3,95	-4,95	-8,42	-1,47	-2,47	-4,66	-0,29	-1,26	-2,08	-0,44	-0,21	-2,03	1,61
SM	-18,95	-35,25	-2,64	-11,04	-17,04	-5,03	-4,73	-7,24	-2,22	-1,94	-3,28	-0,59	-0,83	-1,74	0,07	-0,67	-1,19	-0,14
ST	-19,72	-32,81	-6,62	-9,91	-15,15	-4,66	-6,64	-9,50	-3,78	-2,58	-3,40	-1,76	-1,10	-1,84	-0,35	-0,90	-1,63	-0,17

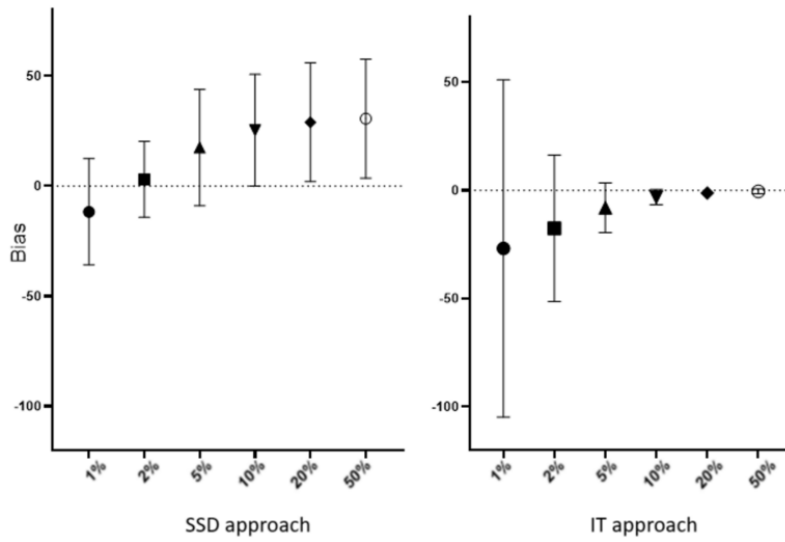
Supplementary Data 4a. Bias results for IT method.

Supplementary Data 4: Bias results for each of their muscles heads of QF and HS. The bias is expressed in

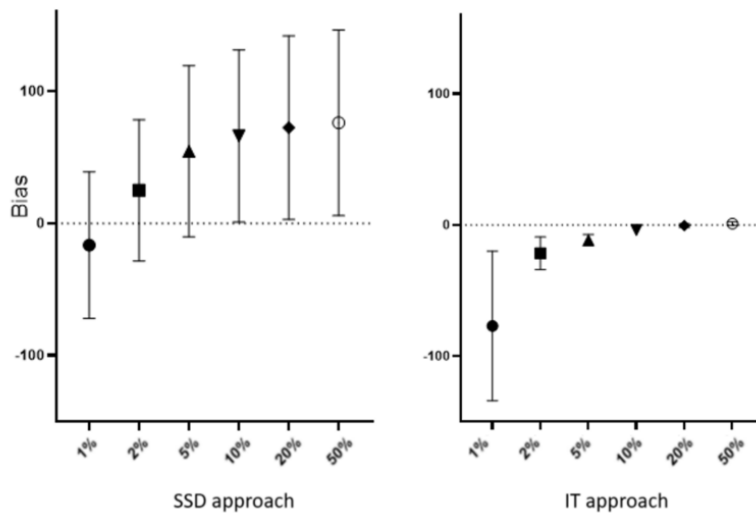
mL.

Supplementary Data 5.

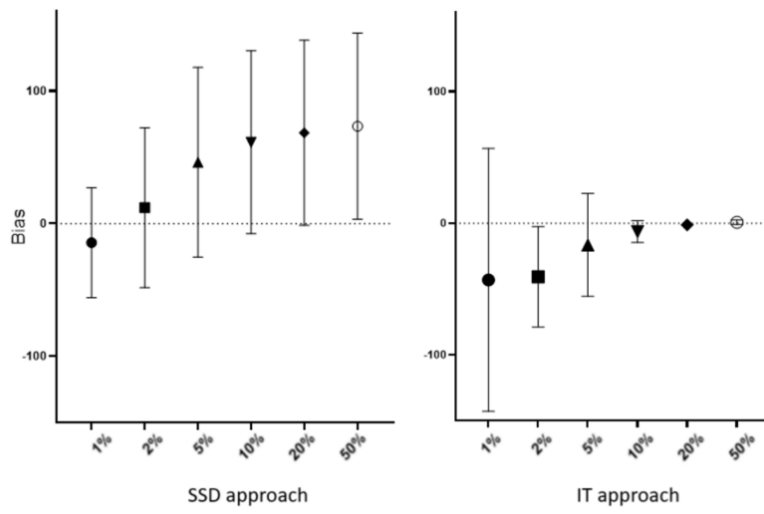
Rectus Femoris



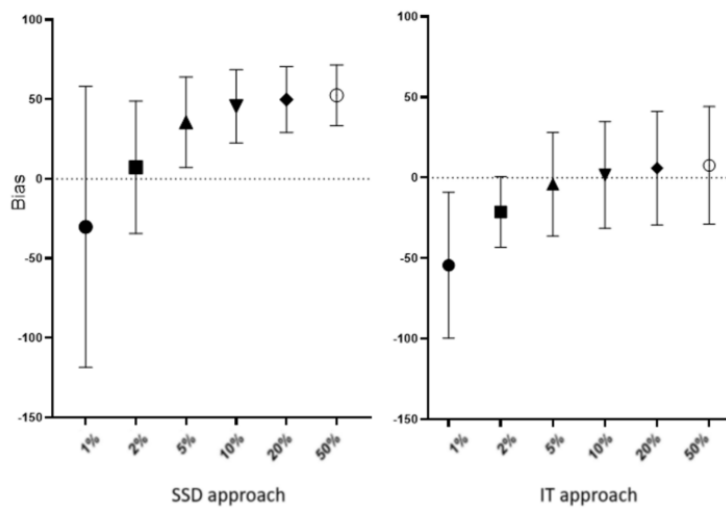
Vastus Intermedius



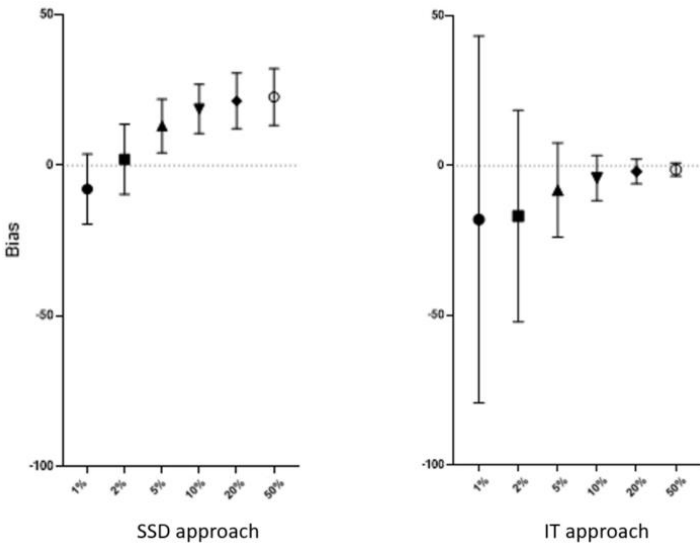
Vastus Lateralis



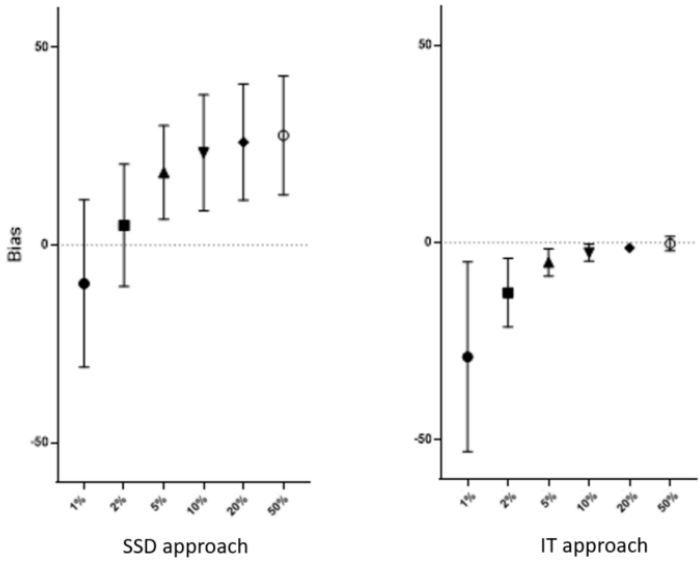
Vastus Medialis



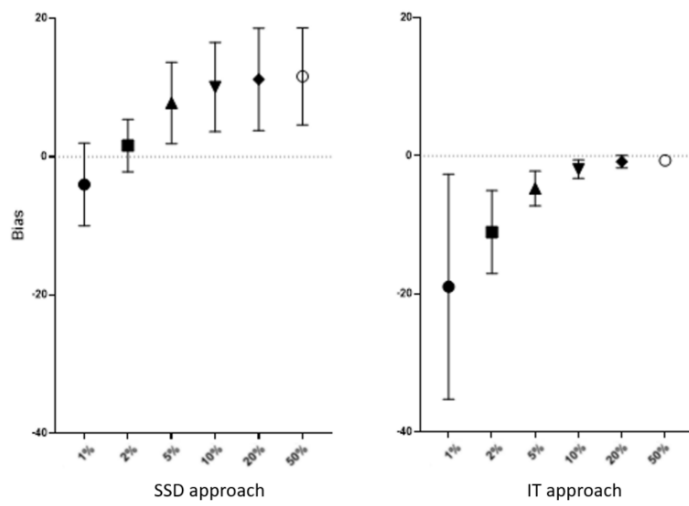
Biceps Femoris Long Head



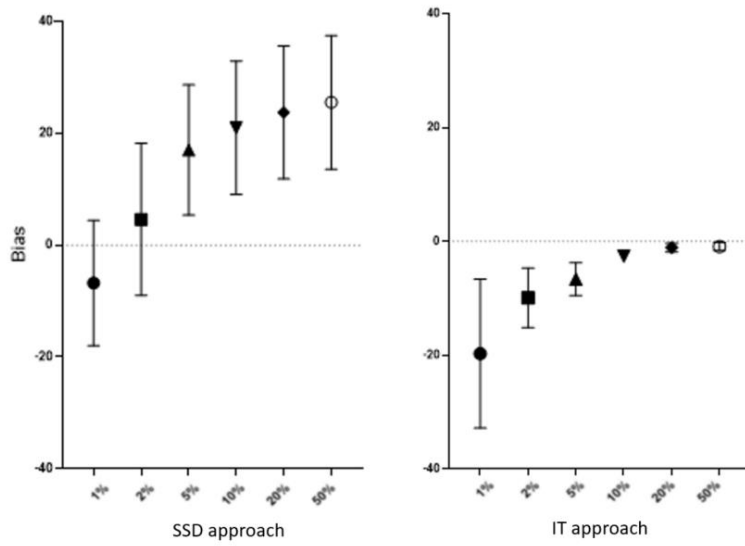
Biceps Femoris Short Head



Semi Membranosus



Semi Tendinosus



Supplementary Data 5. Graphical representation of bias results for each of their muscles heads of QF and HS. The bias is expressed in mL.

Supplementary Data 6.

	SSD1%			SSD2%			SSD5%			SSD10%			SSD20%			SSD50%		
	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+
QF	57,8	45,9	78,2	52,6	41,7	71,1	97,2	77,1	131,4	116,1	92,2	157,1	126,6	100,5	171,2	132,9	105,4	179,7
RF	32,0	21,2	65,2	17,0	11,2	34,6	42,1	27,8	85,7	54,9	36,3	111,8	62,0	41,0	126,1	64,9	42,9	132,1
VI	60,7	40,2	123,6	69,5	46,0	141,5	122,6	81,0	249,5	142,9	94,5	290,8	155,8	103,0	317,2	162,7	107,5	331,1
VL	47,6	31,4	96,8	60,6	40,0	123,3	112,2	74,2	228,4	136,1	90,0	277,0	149,0	98,4	303,2	157,9	104,4	321,4
VM	80,0	52,9	162,8	47,5	31,4	96,7	91,5	60,5	186,1	109,6	72,4	223,0	117,5	77,7	239,2	122,5	81,0	249,3
HS	19,2	15,2	25,9	13,2	10,5	17,8	30,2	23,9	40,8	38,5	30,6	52,1	43,1	34,2	58,4	45,8	36,4	62,0
BL	18,8	12,4	38,2	11,5	7,6	23,4	27,0	17,8	54,9	37,5	24,8	76,3	42,8	28,3	87,1	45,4	30,0	92,4
BS	27,2	18,0	55,4	17,4	11,5	35,4	37,7	24,9	76,8	47,8	31,6	97,3	52,9	35,0	107,7	56,2	37,2	114,4
SM	9,6	6,4	19,6	4,7	3,1	9,6	16,2	10,7	32,9	20,6	13,6	42,0	23,0	15,2	46,7	23,7	15,7	48,2
ST	16,8	11,1	34,3	15,5	10,2	31,5	35,1	23,2	71,4	42,6	28,2	86,7	47,8	31,6	97,3	51,3	33,9	104,3

Supplementary Data 6a: Repeatability Coefficient results for SSD Methods. The CR is expressed in mL.

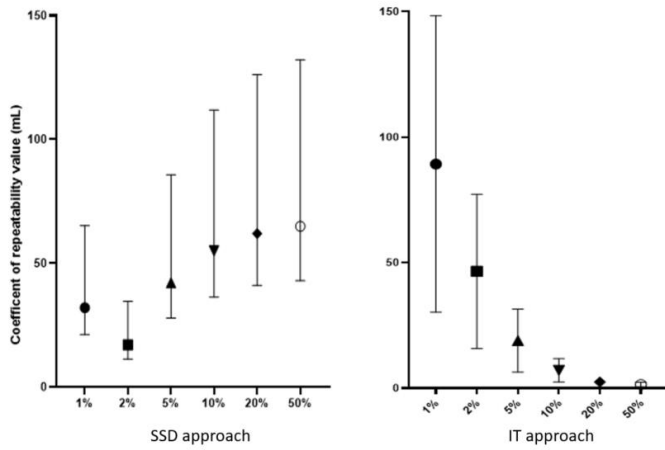
	IT1%			IT2%			IT5%			IT10%			IT20%			IT50%		
	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+	CR	IC-	IC+
QF	124,9	99,1	168,9	58,9	46,7	79,7	32,4	25,7	43,8	17,9	14,2	24,2	17,5	13,9	23,7	18,5	14,7	25,1
RF	89,3	59,0	181,7	46,5	30,7	94,6	18,9	12,5	38,6	7,1	4,7	14,4	2,5	1,6	5,0	1,4	0,9	2,9
VI	160,1	105,8	325,8	44,1	29,1	89,7	23,2	15,3	47,2	8,0	5,3	16,4	1,6	1,1	3,3	2,2	1,5	4,6
VL	125,3	82,8	255,0	87,3	57,7	177,7	48,5	32,1	98,8	14,9	9,8	30,2	4,7	3,1	9,6	2,1	1,4	4,3
VM	114,5	75,7	233,0	46,4	30,7	94,5	30,8	20,4	62,7	30,8	20,4	62,7	34,6	22,9	70,4	36,9	24,4	75,2
HS	49,5	39,3	66,9	27,2	21,6	36,8	13,0	10,3	17,6	6,1	4,8	8,2	2,9	2,3	3,9	2,0	1,6	2,7
BL	53,4	35,3	108,6	37,1	24,6	75,6	17,5	11,6	35,6	8,8	5,8	17,9	4,3	2,8	8,8	2,7	1,8	5,4
BS	60,9	40,2	123,9	26,1	17,3	53,1	10,2	6,8	20,8	5,3	1,7	5,3	2,6	1,7	5,3	1,7	1,1	3,5
SM	40,1	26,5	81,6	22,3	14,8	45,5	9,6	6,3	19,5	4,0	2,6	8,1	1,8	1,2	3,7	1,4	0,9	2,8
ST	40,5	26,8	82,4	20,0	13,2	40,7	13,3	8,8	27,0	5,1	3,4	10,4	2,3	1,5	4,6	1,9	1,2	3,8

Supplementary Data 6b: Repeatability Coefficient results for IT Methods. The CR is expressed in mL.

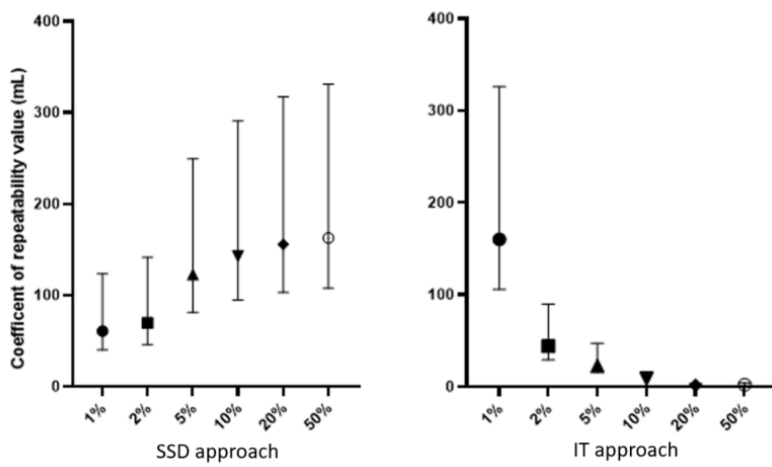
Supplementary Data 6: Repeatability Coefficient results for QF, HS, and each of their muscle head, with the 2 methods

Supplementary Data 7: Graphical representation of Repeatability Coefficient results for QF, HS, and each of their muscle head. The CR is expressed in mL.

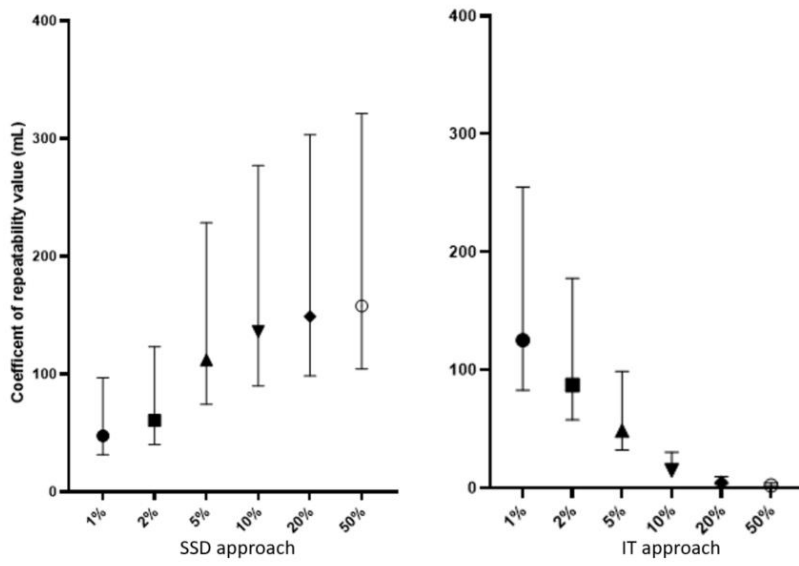
Rectus Femoris



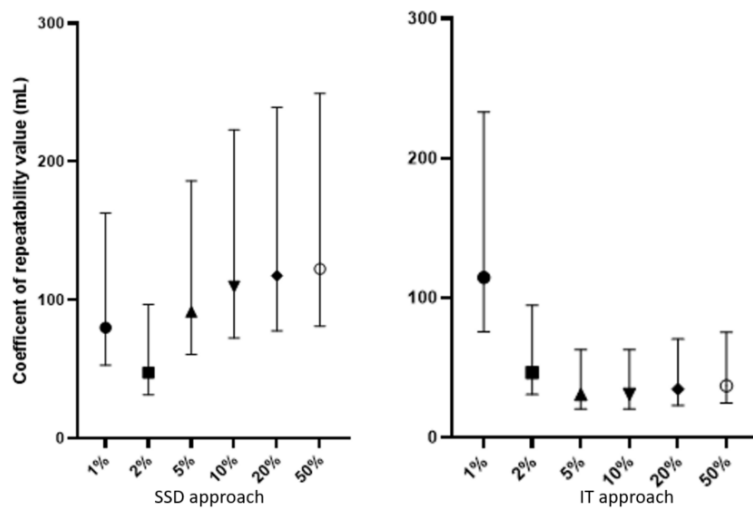
Vastus Intermedius



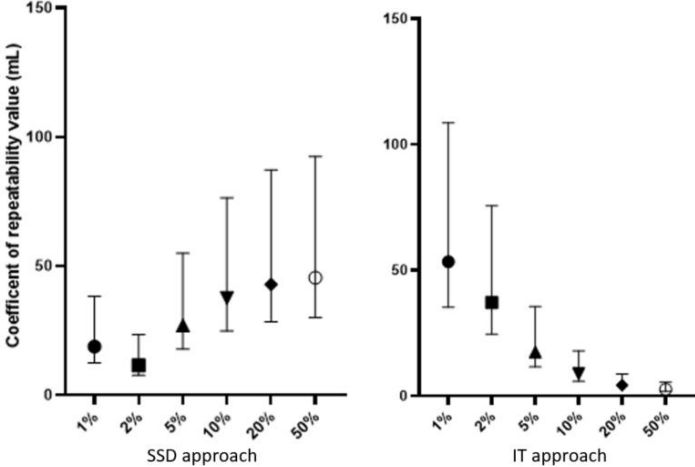
Vastus Lateralis



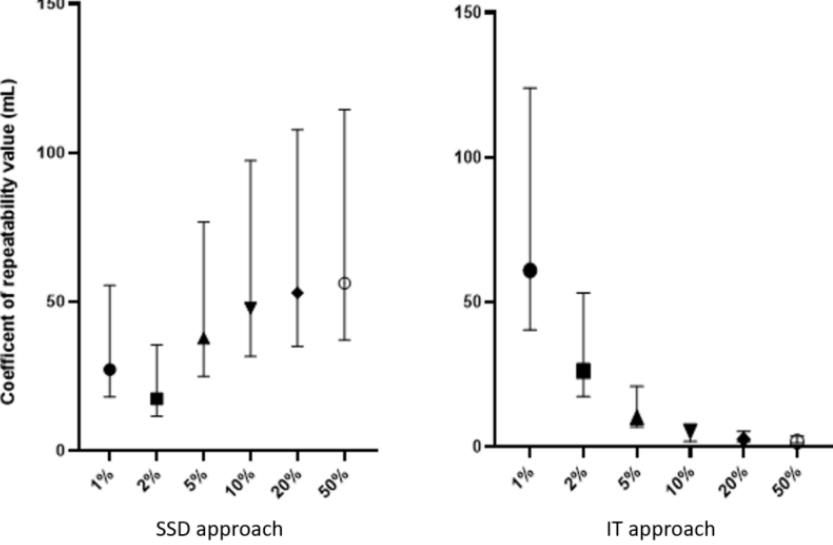
Vastus Medialis



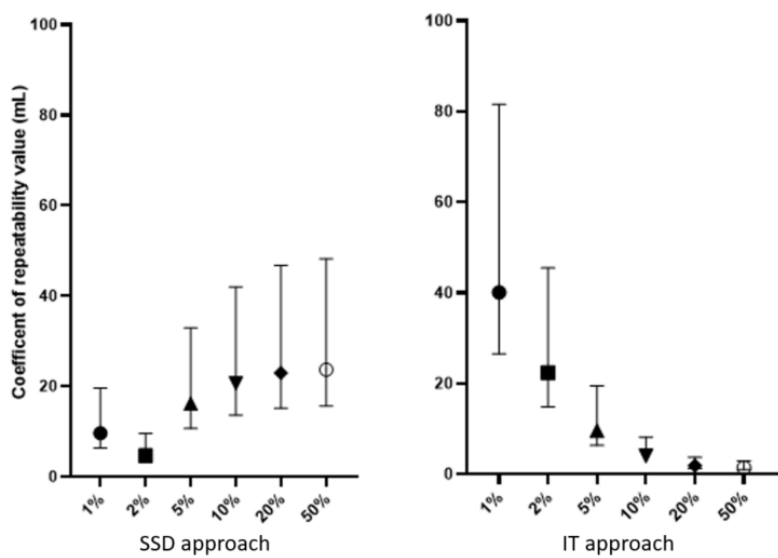
Biceps Femoris Long Head



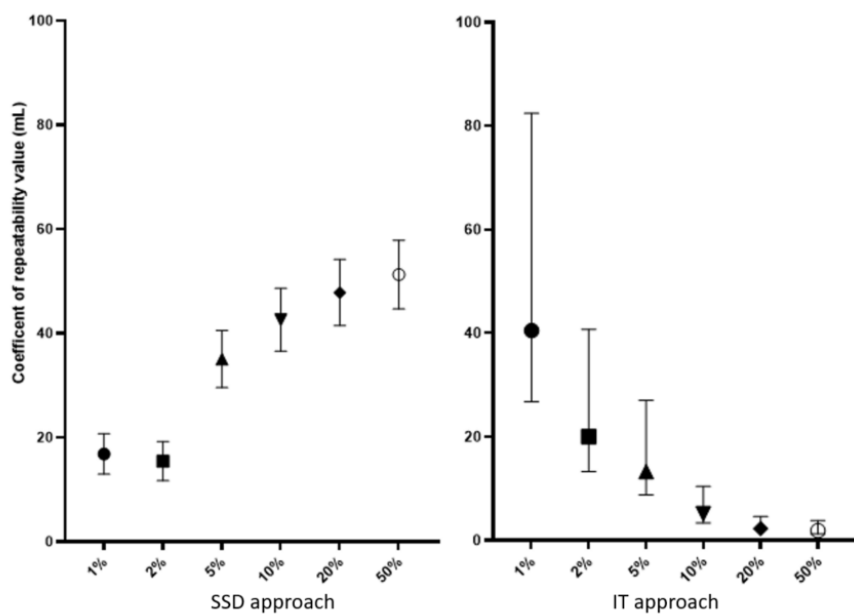
Biceps Femoris Short Head



Semi Membranosus



Semi Tendinosus



c- Discussion

Ainsi, les méthodes d'espacement des coupes, avec ou interpolation, permettant un réel gain de temps de délimitations, peuvent avoir un degré de précision satisfaisant, à certaines conditions bien sûr et à adapter au degré de précision attendu pour une mesure. Il semble que la méthode d'espacement des coupes, associée à une méthode d'interpolation, donnent des résultats fiables, même avec un nombre de coupes limités, comme par exemple une coupe sur 20 (5% des coupes), qui permet d'avoir un bon compromis entre le temps gagné et la fiabilité du volume musculaire estimé. Ainsi, cette méthode que l'on peut considérer comme « semi-supervisée », associe la fiabilité de la délimitation manuelle réalisée par un expert, et la délimitation rapide de la machine, qui se base sur les coupes expertes, permettant de très nettement limiter les erreurs de délimitations. Il semble par exemple difficile de pouvoir appliquer ces mesures à du suivi de volume où la variation de volume musculaire attendu semble très faible, où alors avec un degré d'espacement des coupes très modéré, c'est-à-dire avec au moins 20% des coupes délimitées.

3- Estimation du volume musculaire par les méthodes non supervisées

a- Introduction

Le développement récent des séquences de Machine Learning non supervisées permet de laisser entrevoir la possibilité de bénéficier, « au moindre effort humain », de valeurs quantitatives parmi lesquelles le volume musculaire paraît être la mesure à la fois de plus grand intérêt clinique et de recherche mais aussi le paramètre le plus facilement comparable aux mesures de références, i.e. les mesures réalisées à la main par un expert. Ainsi, avec les données dont nous disposons sur la cohorte MUST (Nguyen et al. 2021), nous avons cherché à savoir où se plaçaient les séquences non supervisées que nous avons développées et utilisées sur l'estimation du volume musculaire des muscles quadricipitaux. Nous avons donc utilisé les méthodes de deep-learning (réseau de neurones de type U-net) (Agosti et al. 2021) et la méthode Multi-atlas (Wang et al. 2013). Nous avons aussi pu comparer ces méthodes à celles utilisées dans la littérature, de type espacement des coupes avec ou sans interpolation.

L'ensemble de ces méthodes doit être utilisé avec grande prudence compte-tenu de leurs précisions respectives, et les conclusions tirées de ces mesures doivent être interprétées avec prudence en fonction de la qualité métrologique de ces méthodes de mesure. L'intérêt de ces méthodes est très important pour l'applicabilité de ces méthodes en radiologie clinique quotidienne, car le temps imposé pour réaliser une mesure de référence n'est pas compatible avec le temps clinique. Concernant les activités de recherche, la possibilité de pouvoir bénéficier de mesures non supervisées permettraient de pouvoir bénéficier de cohortes beaucoup plus importantes en un temps beaucoup plus court, notamment en recherche clinique si les mesures sont réalisées en routine. Ainsi, notre objectif était de comparer les performances des deux méthodes de Machine Learning avec celles d'espacement des coupes avec ou sans interpolation, et à la mesure de référence (manuelle), et ceci sur le groupe musculaire le plus fréquemment évalué dans la littérature, à savoir le quadriceps fémoral.

b- Matériel et méthodes

Nous avons utilisé 7 patients de la cohorte MUST dont les muscles quadriceps avaient été délimités chef par chef de manière manuelle par un expert, sur la séquence « Water » du T1 DIXON. Le volume musculaire global du quadriceps a été calculé en faisant la somme de ses 4 chefs. Cette valeur est utilisée comme valeur de référence. Les techniques d'espacement des coupes, ici nommés IT (interpolation : espacement des coupes par sous-échantillonnage puis interpolation), et US (espacement des coupes par sous-échantillonnage =UnderSampling ; pas d'interpolation associé dans ce cas), ont été détaillées dans le précédent chapitre. Nous avons utilisé les méthodes de segmentations par Machine Learning de type deep-learning (réseau de neurones de type Unet) et Multi-atlas. Nous avons ainsi pu extraire pour chaque méthode et pour chacun des 7 patients un volume musculaire, exprimé en cm^3 . Ce volume musculaire a été ensuite exprimé de manière relative, en pourcentage par rapport à la référence, et ceci de deux manières. Tout d'abord, nous nous intéressions au signe de la différence. Ainsi, cela permettait de voir si l'erreur était commise de manière systématique dans le même sens positif ou négatif, et donc d'évaluer l'exactitude de la mesure (=measure accuracy). Ensuite, nous nous intéressions à la « valeur absolue » de l'erreur (c'est-à-dire sans considérer le sens de l'erreur), permettant d'estimer la précision de la mesure (=measure precision).

c- Résultats

Les résultats sont exprimés dans le tableau 1. De manière très globale, aucune valeur de méthode par patient ne dépasse les 18%, ce qui montre qu'il n'y a pas de délimitations paraissant complètement aberrantes dans l'ensemble. Concernant les moyennes relatives des 7 patients pour chacune des méthodes, aucune ne dépasse les 12%. Sans surprise, la meilleure méthode est celle basée un espacement minimal des coupes (moitié des coupes conservée) associée à une interpolation, qui permet une exactitude et une précision excellente, avec respectivement une moyenne relative de +0,1% et une moyenne relative de la valeur absolue à 0,2%. On s'aperçoit que les méthodes avec interpolation ont plutôt tendance à sous-estimer le volume musculaire alors que celle sans interpolation ont plutôt tendance à le surestimer. Les méthodes de Machine Learning quant à elles donnent d'excellents résultats, avec une excellente exactitude sur l'ensemble des patients, et une précision très correcte, avec une valeur relative de +0.17 pour MultiAtlas avec une valeur relative absolue de 2,80%, et respectivement de -0,22% et de 4,20% pour U-net. Pour toutes les valeurs des patients, les méthodes de Machine Learning ont toutes un écart de moins de 9% par rapport à la référence. Il est intéressant de noter que le sujet à l'origine de l'erreur maximale est le même entre les deux techniques de segmentations non supervisées, ce qui n'est pas le cas pour les méthodes d'espacement des coupes. De plus, ces deux techniques de segmentations non supervisées ne semblent pas être à l'origine d'une sur ou sous-segmentation systématique, ces techniques présentent ici une excellente exactitude, avec donc des moyennes relatives de la valeur absolue proches de 0 (+0.17 pour MultiAtlas et -0.22 pour U-Net).

Sujet	1_abs	1_rel	2_abs	2_rel	3_abs	3_rel	4_abs	4_rel	5_abs	5_rel
Vol_Ref	1869,6	x	2434,2	x	2120,9	x	2447,5	x	2440,2	x
IT_1%	1730,0	-7,50%	2126,8	-12,60%	1934,2	-8,80%	2227,0	-9,00%	2085,2	-14,50%
IT_2%	1789,1	-4,30%	2325,3	-4,50%	2031,0	-4,20%	2312,5	-5,50%	2307,4	-5,40%
IT_5%	1840,1	-1,60%	2397,7	-1,50%	2091,8	-1,40%	2409,7	-1,50%	2388,3	-2,10%
IT_10%	1855,2	-0,80%	2418,3	-0,70%	2106,1	-0,70%	2430,2	-0,70%	2420,0	-0,80%
IT_20%	1866,3	-0,20%	2430,2	-0,20%	2115,8	-0,20%	2444,3	-0,10%	2438,4	-0,10%
IT_50%	1870,4	0,00%	2433,9	0,00%	2122,5	0,10%	2450,9	0,10%	2444,4	0,20%
US_1%	1766,5	-5,50%	2222,6	-8,70%	2070,1	-2,40%	2322,1	-5,10%	2389,4	-2,10%
US_2%	1872,8	0,20%	2386	-2,00%	2169,7	2,30%	2442,6	-0,20%	2608,9	6,90%
US_5%	1956,1	4,60%	2494,2	2,50%	2275,1	7,30%	2566,5	4,90%	2766,7	13,40%

US_10%	1989,2	6,40%	2532,9	4,10%	2313,2	9,10%	2605,1	6,40%	2817,3	15,50%
US_20%	2004,0	7,20%	2552,1	4,80%	2327,9	9,80%	2631,4	7,50%	2846,2	16,60%
US_50%	2013,7	7,70%	2564,4	5,30%	2341,4	10,40%	2641,4	7,90%	2859,7	17,20%
Multiatlas	2032.4	+8.01%	2478.5	+1.79%	2102.8	-0.86%	2368.5	-3.33%	2410.1	-1.25%
Unet	2052.8	+8.92%	2283.4	-6.61%	2122.4	+0.07%	2355.4	+3.91%	2353.6	-3.68%

Sujet	6_abs	6_rel	7_abs	7_rel	Moy_abs	Moy_rel	Moy_rel_VA
Vol_Ref	1322,9	x	2714,1	x	2192,8	x	x
IT_1%	1206,3	-8,80%	2455,8	-10,40%	1966,5	-10,3%	11,7%
IT_2%	1265,4	-4,30%	2578,0	-6,00%	2086,9	-5,8%	4,9%
IT_5%	1293,4	-2,20%	2661,2	-2,90%	2154,6	-1,7%	2,1%
IT_10%	1313,8	-0,70%	2686,9	-2,00%	2175,8	-0,8%	0,9%
IT_20%	1319,8	-0,20%	2713,1	-1,00%	2189,7	-0,1%	0,3%
IT_50%	1323,3	0,00%	2719,4	-0,80%	2195,0	+0,1%	0,2%
US_1%	1313,0	-0,80%	2685,2	-2,00%	2109,8	-3,8%	3,8%
US_2%	1387,9	4,90%	2823,4	3,00%	2241,6	+2,2%	2,8%
US_5%	1441,6	9,00%	2963,7	8,10%	2352,0	+7,3%	8,1%
US_10%	1472,1	11,30%	3011,0	9,80%	2391,5	+9,1%	8,9%
US_20%	1484,1	12,20%	3036,2	10,80%	2411,7	+10,0%	9,8%
US_50%	1492,3	12,80%	3051,9	11,30%	2423,5	+10,5%	10,4%
Multiatlas	1280.9	-3.28%	2689.5	-0.91%	2194,7	+0,17%	2,80%
Unet	1383.8	+4.40%	2768.7	+1.97%	2188,6	-0,22%	4,20%

Tableau 1. Volume musculaire quadricipital global pour les 7 patients de la cohorte MUST.

Sont exprimés la valeur de référence (manuelle), les techniques d'espacement des coupes par sous-échantillonnage avec (IT) et sans (US) méthode d'interpolation, en fonction des différents degrés de sous échantillonnage (le pourcentage représente le nombre de coupes conservées), ainsi que les méthodes de segmentations non supervisées par Machine Learning de type Unet et Wang. Les valeurs absolues sont exprimées en cm³, les valeurs relatives sont exprimées en pourcentage exprimant le rapport entre la valeur absolue à celle de la référence. Moy-rel correspond à la moyenne relative avec prise en compte du sens de la différence, et Moy-rel-VA à la moyenne des valeurs absolues des différences, sans prise en compte du sens de la différence.

Abs=absolu ; Rel=relative ; VA= Valeur Absolue ; IT=interpolation (sous échantillonnage avec méthode d'interpolation), US=undersampling sous échantillonnage sans interpolation).

d- Discussion

Nous avons ainsi pu comparer l'estimation du volume musculaire du quadriceps par les méthodes non supervisées de Machine Learning sur une population d'ultra-trailleurs, en comparaison à la méthode manuelle considérée comme la référence, et à des méthodes de d'espacement des coupes à différents degrés et avec ou sans interpolation. Il en ressort que, tout d'abord, les résultats soient relativement superposables entre les deux méthodes de Machine Learning (Unet : Deep-Learning ; et Wang : MultiAtlas).

De plus, il semble que ces méthodes de Machine Learning semblent désormais suffisamment développées pour pouvoir être utilisées pour estimer le volume musculaire, dans certaines situations. La fiabilité de ces méthodes semble ainsi désormais suffisamment optimisée pour juger des différences attendues de l'ordre de 10%, l'écart avec la référence et presque toujours en deçà des 5 % et systématiquement en dessous des 10%.

Par rapport aux méthodes d'espacement des coupes avec ou sans interpolation, en terme d'estimation du volume, les méthodes de Machine Learning semblent comparables avec interpolation à 5 ou 10%. Ces méthodes nécessitent tout de même de délimiter une coupe sur 10 ou 20, ce qui est tout de même chronophage (environ 30 à 60 coupes à délimiter), certes moins que les environs 600 coupes d'un muscle entier comme ici sur une épaisseur de coupe infra-millimétrique.

Ainsi, si on cherche par exemple à comparer le volume musculaire entre les individus, même dans une population supposée relativement homogène comme dans cette cohorte MUST composée uniquement d'ultra-trailleurs, on perçoit déjà d'importants écarts de volume musculaire, s'étendant de 1323 à 2714cm³, soit plus du double. On peut imaginer qu'on puisse aisément individualiser des sujets pathologiques ou non au sein d'une cohorte de patients attendue comme étant relativement hétérogène. Il faut tout de même garder à l'esprit que les modifications de volume musculaire lors d'un évènement physiologique ou pathologique (entraînement, alitement, pathologie musculaire ou générale...) induisent parfois des modifications minimales (Mathur et al. 2008), et dont seule une méthode très exacte et précise permet de pouvoir conclure de manière fiable à une véritable modification de volume et non à un simple biais de mesure. De plus, une asymétrie de volume entre les côtés

droits et gauches pourrait être un élément intéressant à connaître chez les sportifs, avec un faible écart attendu (hors cas pathologique après blessure ou immobilisation) et nécessiterait là aussi un certain degré de précision.

De plus, il faut juger de manière indépendante l'estimation de volume et la qualité « réelle » de la segmentation, c'est-à-dire pixel par pixel. Ainsi, l'estimation du volume n'est qu'un indicateur assez grossier de l'estimation de la délimitation, mais ce qui n'empêche pas d'avoir une très bonne estimation de volume concomitant avec un DICE proche de 0, c'est-à-dire une délimitation jugée très mauvaise. Par conséquent, une méthode à l'origine d'une bonne estimation du volume musculaire n'est pas synonyme de méthode de délimitation précise.

De plus, ces résultats ne peuvent être généralisées qu'avec grande prudence. Premièrement, il s'agit d'une groupe musculaire donné, volumineux notamment chez ces patients sportifs. Ensuite, notre population est particulière, les ultratraileurs n'ayant que peu de graisses entre les fascias musculaires, ce que rend plus difficile la délimitation quel que soit la méthode. Par ailleurs, les méthodes de segmentations non supervisées sont très différentes les unes des autres et en constante évolution. De plus, la modestie de notre échantillon rend difficilement généralisable ces résultats. Par ailleurs, nous avons montré que ces IRM ont été réalisées sur une machine 1.5 Tesla, et que la méthode est encore difficilement exportable sur une machine 3 Teslas. Il en est de même sur les autres caractéristiques des séquences d'acquisition, dont les moindres modifications peuvent changer les caractéristiques de l'image et donc les paramétrages de séquences.

Au-delà de la robustesse et de la fiabilité de ces méthodes, il faut aussi prendre en compte le temps de traitement de la délimitation non supervisée, qui nécessite encore beaucoup de temps de traitement informatique et des machines très puissantes. Ainsi, ces méthodes semblent utilisables en recherche fondamentale et clinique, difficilement encore en pratique clinique courante.

e- Conclusion

L'utilisation des méthodes de Machine Learning pour évaluer le volume musculaire du quadriceps semble donc désormais d'une fiabilité suffisante pour être utilisée en recherche

clinique, en gardant bien à l'esprit que leur fiabilité, comme celle des méthodes d'espacement des coupes avec ou sans interpolation, n'est pas encore optimale et doit être utilisé avec prudence pour juger de faibles variations de volume de l'ordre de moins de 10%.

4- Discussion

Ainsi, nous avons pu évaluer la fiabilité des méthodes d'espacement des coupes avec et sans interpolation et des méthodes d'Intelligence Artificielle sur l'estimation du volume musculaire.

Il est tout d'abord intéressant de noter que globalement, les méthodes d'espacement des coupes avec interpolation (méthode semi-supervisée) ou les méthodes d'Intelligence Artificielle (méthode non supervisée), que ce soit par méthode Multi-Atlas ou par Deep-Learning, font les mêmes erreurs spatiales lors des délimitations musculaires, à savoir principalement aux interfaces muscles/muscles et muscle/tendon. Il est aussi intéressant de noter que ces erreurs sont, là aussi, généralement les mêmes entre les experts, comme nous l'avons précédemment montré.

Force est de constater que, pour toute estimation du volume musculaire des cuisses, dans le domaine clinique comme dans le domaine de la recherche, un compromis précision de la mesure versus temps passé, doit être pris en considération ; encore faut-il avoir une idée de la précision voulue et du temps passé pour délimiter un groupe musculaire. Afin d'avoir un ordre d'idée, délimiter de manière attentive un groupe musculaire comme les quadriceps ou les ischio-jambiers, chef par chef, même par quelqu'un d'entraîné, met en général au moins 40 heures si on veut délimiter les coupes de façon millimétrique ou infra millimétrique comme ici, en considérant qu'il y a environ un peu plus de 600 coupes à délimiter, soit environ 2500 délimitations (4 chefs par muscle ou groupe musculaire), ce qui représente seulement 58 secondes par coupe de muscle délimité... ce qui est court si on veut vraiment faire une segmentation précise pixel par pixel, notamment pour les chefs musculaires compliqués, a fortiori dans les zones difficiles, comme par exemple pour les ischio-jambiers le semi-membraneux à son tiers proximal au niveau de sa naissance musculaire, ou pour le quadriceps le vaste intermédiaire et ses limites avec les vastes médial et latéral.

On peut considérer qu'il existe deux types de méthode dite « semi-supervisées ». La première est celle correspondant à la correction des délimitations créées par les méthodes de Machine Learning. Pour cette méthode, il ne faut pas négliger le temps de la correction. En effet, si l'on souhaite faire une correction exigeante, il est assez long de devoir corriger les pixels que l'on juge mal considérés, notamment en périphérie du muscle, et cela peut être presque aussi long que de réaliser les délimitations « *de novo* ». De plus, il existe parfois de longues zones mal délimitées, et la « pré-délimitation » par la machine peut induire l'opérateur en erreur. Par contre, pour les chefs musculaires relativement faciles à délimiter et peu à risque d'erreurs, comme par exemple le chef droit antérieur du quadriceps dans ses deux tiers proximaux, la délimitation réalisée par machine Learning fait gagner beaucoup de temps.

La deuxième méthode « semi-supervisée », correspondant à la méthode de segmentation manuelle espacée des coupes suivie d'une interpolation par des méthodes « non supervisées ». Cette méthode a l'avantage de permettre à la méthode non supervisée de se baser sur des coupes manuelles considérées comme fiables. Par contre, le principal inconvénient est le fait que les segmentations finales ne sont pas vérifiées, car l'humain intervient avant la machine. L'avantage est le fait que la machine se base sur des coupes fiables, espacées régulièrement, permettant d'éviter les erreurs grossières de délimitations, où toute une partie musculaire est considérée comme faisant partie d'un chef musculaire à la place d'un autre.

Dans la littérature, la méthode de segmentation manuelle espacée des coupes n'est pas toujours suivie d'une interpolation, quand on souhaite simplement vouloir estimer le volume musculaire. Ainsi, de nombreux articles montrent que la délimitation d'une ou quelques coupes centrales, permettent d'avoir une appréciation satisfaisante du volume musculaire. Ce constat n'est pas aberrant compte-tenu du fait que les coupes situées dans la partie centrale du muscle sont souvent les plus trophiques (aspect en général fusiforme des muscles), et que ce sont les extrémités qui sont le plus sujets aux mauvaises délimitations. Toutefois, la méthodologie utilisée dans la littérature est très difficile à évaluer car les méthodes sont très variées. Ainsi, certains articles se sont focalisées simplement sur un chef musculaire (Franchi et al. 2014b), certains deux muscles ensemble (Nordez et al. 2009), d'autres ont délimités le muscle en entier, sans séparer chacun des chefs musculaires, pour avoir le volume complet du muscle (Nuell et al. 2019b). De plus, même l'espace entre les délimitations prise comme

référence dans les études méthodologiques varie, l'épaisseur de coupe variant entre les articles, et il peut ou non y avoir un espace intercoupes (Franchi et al. 2014b; Hioki et al. 2020b; Kilroe et al. 2020b; Trappe, Lindquist, et Carrithers 2001b). Ces méthodes ont mêmes été appliquées à l'échographie en l'associant sur quelques coupes à la hauteur du fémur (Monti et al. 2020).

Notre travail comporte des limites. Tout d'abord, nous avons considéré uniquement les muscles de la cuisse. Ces muscles sont parmi les plus imposants du corps humain. On peut ainsi imaginer que cela rend plus facile l'estimation du volume, quelle que soit la méthode utilisée. Ainsi, il est possible que pour la délimitation de petits muscles, par exemple les muscles de la main, les mêmes erreurs de délimitation en périphérie et en distalité des muscles serait à l'origine d'une erreur de volume proportionnellement beaucoup plus importante, étant donné que le volume global du muscle est beaucoup plus faible. De plus, la population étudiée dans notre travail est celle de sportifs, qu'ils soient professionnels ou non, et qu'il s'agisse des trailers (cohorte MUST), ou d'autres sports (cohorte HAMMER, avec principalement des athlètes de sprint et des footballeurs). Cela peut induire un biais par rapport à la population générale qui n'est pas forcément sportive. Toutefois, cela rend notre travail intéressant car la difficulté est nettement majorée en prenant des sujets sportifs, avec des muscles très trophiques et avec peu de graisse inter musculaire, rendant les délimitations entre les muscles plus complexes. L'âge assez jeune de notre population, et l'absence de pathologie musculaire ou de pathologie à l'origine d'une perte de trophicité, rend difficilement comparable notre travail à un autre type de population, par exemple âgé ou atteint d'une pathologie musculaire ou générale.

De plus, il faut prendre en considération les outils à disposition. Les outils d'Intelligence Artificielle ne sont pas disponibles partout et pour tout le monde, et il est fortement probable, malgré leur amélioration et leur probable diffusion dans les années à venir, que ceux-ci ne soient pas gratuits et en accès libre. De plus, en dehors du logiciel même, cela nécessite des processeurs informatiques très puissants, qui ne sont pas disponibles partout.

Enfin, il faut bien différencier le temps de recherche et le temps médical en pratique clinique radiologique quotidienne. Ainsi, pour qu'une méthode soit utilisée couramment, il faut à la fois que celle-ci soit disponible immédiatement, mais aussi qu'elle ne soit pas excessivement

chronophage, à la fois de temps de délimitations mais aussi de temps de post-traitement par la machine.

V-Discussion générale

A - Résumé des principaux résultats

Notre revue de la littérature sur les lésions musculaires des ischio-jambiers explorées par IRM a permis de démembrer la fréquence des différentes atteintes des muscles ischio-jambiers, en termes de chefs musculaires, de types de tissus, de tailles de la lésion... Elle a aussi montré que la description IRM de ces lésions est encore très hétérogène et manque de codification dans la littérature. Les lésions des ischio-jambiers sont toujours globalement considérées comme une seule et même entité. A l'IRM, les lésions sont décrites selon le muscle touché et la structure tissulaire, mais rarement de façon combinée. D'autres composantes de la description de la lésion, tels que le volume lésionnel, la localisation proximo-distale, la surface atteinte, la présence d'un hématome ou d'une cicatrice fibreuse, d'un épanchement inter-aponévrotique, sont rarement décrites. Pourtant, le polymorphisme de ces lésions se retrouve déjà sur le plan clinique, avec le mécanisme lésionnel. Ainsi, nous avons pu individualiser et confirmer deux principaux types mécanismes de lésion : lors d'un sprint et lors d'un étirement du muscle. La mise en place de notre cohorte HAMMER (HAMstring MEchanism mRi) avec un suivi prospectif multicentrique des lésions des ischio-jambiers à l'IRM nous a permis de mettre en évidence un lien entre le mécanisme lésionnel et les caractéristiques des lésions à l'IRM : le mécanisme d'étirement présente un grade lésionnel et un volume lésionnel plus important, c'est-à-dire une sévérité plus importante. Par ailleurs, nous avons montré une relation entre un paramètre clinique d'évaluation simple : la douleur au moment de la lésion, et le volume lésionnel. Cette relation était toutefois modérée. Il n'y avait par ailleurs pas de différence significative entre cette douleur et le grade de la lésion ou le muscle affecté. Nous avons aussi montré que le plus faible volume lésionnel, l'âge plus bas, le sexe masculin, un plus petit indice de masse corporelle et la plus faible douleur initiale étaient des facteurs de risque de récurrence. Ainsi, nous avons montré que la sévérité de la lésion initiale ne semblait pas être liée au risque de récurrence, et qu'au contraire, lors d'une lésion moins importante le risque de récurrence était plus important. Une explication pouvait être que l'épisode lésionnel pouvait être banalisé et la prise en charge négligée.

Par la suite, à partir des données IRM issues de la cohorte HAMMER, a été établi un programme de segmentation non supervisée par machine learning des muscles de la cuisse, à

partir de différentes méthodes. Nous avons pu au préalable analyser la fiabilité des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour déterminer le volume musculaire (méthodes d'espacement des coupes, avec ou sans interpolation), et la comparer avec ces méthodes d'Intelligence Artificielle. Nous avons montré que les méthodes d'espacement des coupes utilisées dans la littérature doivent être employées avec prudence et leur fiabilité doit être en rapport avec la précision de l'objectif. Les méthodes de segmentations non supervisées par Intelligence Artificielle montrent d'ores et déjà une fiabilité intéressante en terme de fiabilité d'estimation du volume, et utilisables en recherche dans des domaines bien définies.

B - Explications et interprétations des principaux résultats

Nous avons donc confirmé que la description des lésions des ischio-jambiers est décrite encore de manière très hétérogène et manque de codification à l'IRM. Cela est en partie lié au caractère relativement récent de l'IRM (années 90), et que l'IRM n'est pas toujours réalisée en routine pour des lésions musculaires, soit pour des raisons de pratique, soit pour des questions de disponibilité en cohérence avec les délais de blessure sportive. De plus, la description complète de la lésion (volume lésionnel, la localisation proximo-distale, la surface atteinte, la présence d'un hématome ou d'une cicatrice fibreuse, d'un épanchement inter-aponévrotique...) est relativement longue et fastidieuse à réaliser et ainsi assez compliqué à réaliser dans le cadre clinique et ses contraintes de temps. Elle nécessite de plus une acquisition de tout le volume musculaire ce qui n'est pas toujours possible en pratique clinique courante. Ainsi, afin d'optimiser le « temps machine », la zone musculaire douloureuse est ciblée par le radiologue et le manipulateur en radiologie, et guidée par la prescription du clinicien, afin de que l'IRM ne se focalise que sur un volume restreint. Par ailleurs, même si des consensus essayent petit à petit d'être trouvés notamment sur les classifications (Pollock et al. 2014), leur utilisation n'est pas encore systématique par les radiologues et les cliniciens sur le terrain. L'exhaustivité des paramètres de la lésion n'est pas toujours atteinte en recherche, encore moins en pratique clinique courante.

La mise en place de notre cohorte HAMMER nous a permis de montrer que le mécanisme d'étirement présente un grade lésionnel et un volume lésionnel plus importants, c'est-à-dire une sévérité plus importante. Une lésion des ischio-jambiers avec un mécanisme d'étirement doit donc particulièrement alerter le clinicien. Ce constat doit poser la question de séparer

différents types de lésions des ischio-jambiers en fonction du mécanisme lésionnel, avec possiblement un temps de retour au sport et des types de réhabilitation différents.

Nous avons montré qu'il existait une corrélation significative mais faible entre l'intensité de la douleur au moment de la blessure et le volume lésionnel en hypersignal T2 à l'IRM. Il semble donc que la douleur seule au moment de la blessure ne permette pas d'estimer le volume lésionnel à l'IRM de manière fiable, et qu'il parait difficile pour le moment de se passer d'une IRM si l'on souhaite connaître le volume lésionnel.

Par ailleurs, la sévérité de la lésion initiale ne semblait pas être liée au risque de récurrence. Une explication à cela peut être ainsi être discutée : l'épisode lésionnel peu sévère (douleur peu importante) pouvait être banalisé et la prise en charge négligée. Par ailleurs, le terrain (homme jeune) pourrait être en rapport avec un manque d'expérience des blessures et une reprise du sport même contre avis médical. Inversement, les sujets plus âgés pourraient avoir acquis plus de sagesse, et avoir bien compris l'importance de ne pas banaliser les blessures. Par ailleurs, une expérience antérieure de blessure, même en dehors des ischio-jambiers, pourrait avoir sensibilisé le sujet sur l'importance de la prise en charge adéquate de ces lésions musculaires et notamment de l'importance du respect du temps de retour au sport.

Nous avons montré l'intérêt de rajouter une étape d'interpolation aux segmentations espacées pour estimer le volume musculaire. Ainsi, un muscle segmenté manuellement de manière espacé, associé à une interpolation, donne de très bons résultats en terme d'estimation du volume musculaire, à condition que les coupes segmentées ne soient pas trop espacées. Cela peut être réalisé facilement grâce à un logiciel de traitement des images en pratique clinique courante, cette étape ne nécessitant pas une énorme capacité de processeurs.

Nous pouvons désormais créer, grâce à différents outils d'Intelligence Artificielle, des méthodes de segmentations non supervisées. Ceux-ci montrent d'ores et déjà une fiabilité intéressante en terme d'estimation du volume. Toutefois, la nécessité de post-traitement des images avec des processeurs de grande capacité rend encore à ce jour difficile leurs utilisations en pratique clinique courante pour l'analyse du volume musculaire.

Ainsi, nous avons donc montré que les données IRM des lésions des ischio-jambiers utilisées en recherche manque d'homogénéité notamment en terme de classification ; que le

mécanisme lésionnel semble être la première étape pour séparer les différents types de lésions des ischio-jambiers, et que le mécanisme d'étirement à l'origine de lésions plus sévères ; que la douleur au moment de la blessure est corrélée au volume lésionnel mais de manière insuffisante pour qu'on puisse se passer d'une IRM pour estimer ce volume lésionnel ; que la sévérité de la lésion initiale ne semble pas être liée au risque de récurrence ; qu'il existe un intérêt de rajouter une étape d'interpolation aux segmentations espacées pour estimer le volume musculaire ; et que les méthodes de segmentation non supervisée permettent aujourd'hui une fiabilité intéressante en terme d'estimation du volume musculaire.

C - Limites

La limite principale de notre travail est le nombre de patients inclus dans la cohorte HAMMER. En plus des critères d'exclusion de l'étude restreignant le nombre de patients éligibles, la période « Covid » pendant laquelle s'est déroulée cette thèse a drastiquement diminuée le nombre de lésions (arrêt des pratiques sportives et surtout des compétitions), et leur exploration par IRM (accessibilité restreinte des machines, refus des patients de se rendre à l'hôpital...). Ce manque de données peut être à l'origine de l'absence d'association mise en évidence entre deux variables. Ceci est particulièrement vrai quand on souhaite faire des analyses avec différentes sous catégories, comme par exemple dans notre cas en fonction du mécanisme clinique et des différents grades de gravité. Par ailleurs, le caractère rétrospectif de l'étude limite la fiabilité des nombreux éléments recueillis par l'interrogatoire au moment de la lésion. De plus, le recueil des récurrences de lésion des ischio-jambiers de manière rétrospectif limite là aussi la fiabilité des données.

Notre travail sur l'élaboration de méthodes non supervisées de segmentations musculaires par Machine Learning, à partir de segmentations manuelles, a été élaboré à partir d'un nombre restreint de segmentations. Cela est lié au caractère extrêmement chronophage de la segmentation manuelle de plusieurs chefs musculaires sur l'ensemble de leurs volumes, et donc sur un nombre de coupes très important. Ainsi, les coupes étaient infra-centimétriques et induisant des segmentations sur plus de 600 coupes, soient près de 2400 délimitations à réaliser par patient, ce qui pouvait correspondre à plus de 50h de travail par patient. Sur un modèle d'enrichissement progressif du modèle à partir de nouvelles segmentations, ou de correction manuelle des délimitations préalablement segmenter automatiquement par des

méthodes d'intelligence artificielle (méthodes semi-supervisées), la fiabilité des méthodes progressera au fur et à mesure.

Enfin, notre travail a porté sur certains groupes musculaires (quadriceps et ischio-jambiers), avec une machine IRM dotée de certains paramètres (champ magnétique, gradient, etc...) et des méthodes de segmentations non-supervisées particulières (Multi-Atlas et Unet). Ainsi, il peut être difficile de transposer les conclusions de ce travail sur d'autres groupes musculaires, d'autres machines IRM, ainsi que sur d'autres types de méthodes non-supervisées de segmentation. Ainsi, l'utilisation de segmentations non-supervisées par Intelligence Artificielle reste en théorie uniquement applicable aux mêmes modalités que celles utilisées pour les établir. De plus, leur utilisation reste aussi uniquement applicable à la même population, c'est à dire aux patients jeunes, sportifs, et blessés aux IJ. Toutefois, compte-tenu de la trophicité et de l'absence d'involution adipeuse de ce type de patients, les délimitations sont beaucoup plus difficiles à réaliser, et donc leur extension à des populations plus âgées, non sportives, ou pathologiques, devrait être assez aisée (délimitation beaucoup plus facile des muscles lorsque ceux-ci sont atrophiques et qu'il existe de la graisse en intermusculaire).

D - Perspectives

Malgré l'intérêt porté aux lésions des ischio-jambiers dans le domaine clinique et de la recherche, la fréquence de celles-ci continue d'augmenter et ces lésions sont très péjoratives dans la vie du sportif. La place de l'IRM semble encore incomplètement définie. Ainsi, les perspectives de travail dans la continuité de cette thèse sont multiples, à la fois par 1) La standardisation des comptes rendus IRM, permettant de faciliter la recherche clinique 2) La continuation de la cohorte HAMMER avec la poursuite des recherches sur l'individualisation de plusieurs types de lésions des ischio-jambiers 3) La poursuite du travail sur l'exploration des paramètres quantitatifs avec le développement des méthodes d'Intelligence Artificielle.

La standardisation des comptes rendus IRM semble être indispensable afin de pouvoir homogénéiser les pratiques et donner au clinicien, avec des classifications connues par chacun, les informations dont il a besoin pour prendre en charge ces lésions. Concernant le grade lésionnel, la classification BAMIC, récemment décrite (Patel et al. 2015; Pollock et al.

2014), semble s'établir progressivement comme la référence. Un consensus d'expert (Paton, Court, et al. 2023; Paton, Read, et al. 2023; Plastow et al. 2023) est en faveur de l'utilisation de cette classification, qui devrait tendre à être utilisée de manière consensuelle en pratique courante. Ce consensus insiste aussi sur l'intérêt de l'évaluation plurifactorielle des lésions des ischio-jambiers, avec notamment la précision du chef touché, le mécanisme de la lésion, la demande sportive, ainsi que les critères fonctionnels.

Par ailleurs, la poursuite de la cohorte HAMMER permettra l'inclusion de plus de patients. Son objectif sera la poursuite de l'individualisation de plusieurs types de lésions des ischio-jambiers. Cela pourrait permettre l'analyse fiable de certains sous-groupes de patients. De plus, l'extension à un suivi prospectif des récurrences aura l'intérêt d'évaluer de manière prospective les récurrences et ses facteurs de risque associés. Il serait aussi intéressant de pouvoir tester les différentes approches rééducatives en fonction du sous-type de lésion des ischio-jambiers. Cette individualisation pourrait commencer par le mécanisme lésionnel, notamment entre les mécanismes de sprint et d'étirement, dont nous avons montré les différentes caractéristiques en terme d'imagerie. Un article récent (Gronwald et al. 2022) a exploré les lésions des ischio-jambiers en analysant les vidéos des lésions, pour analyser le mécanisme lésionnel. Cette approche est très intéressante car elle permet d'étudier le mécanisme de la lésion de manière fiable par un panel d'experts. Cette approche par analyse vidéo a été aussi combinée avec une analyse de l'IRM de ces lésions (Jokela et al. 2023). Il est détaillé des mécanismes lésionnels en sprint, en étirement mais aussi par mécanisme mixte. Il est intéressant de noter que dans la plupart des lésions (93%) impliquaient une flexion du genou <45 degrés, et que la flexion du tronc et de la hanche étaient également des facteurs biomécaniques typiques associés aux lésions des ischio-jambiers. Cet article ne traite toutefois que de seulement 14 lésions des ischio-jambiers au total, il est ainsi difficile de pouvoir conclure spécifiquement sur une association entre les paramètres « mécanisme lésionnel » et « localisation de l'atteinte ». L'individualisation des lésions des ischio-jambiers pourra aussi se poursuivre en fonction du risque de récurrence et temps de retour au sport, en fonction des grades lésionnels, du volume, et de la combinaison muscle/structure tissulaire/localisation proximo-distale. Au-delà du mécanisme lésionnel, et afin d'optimiser la sélection des patients éligibles à une IRM, il semblerait que d'autres paramètres d'examen clinique devraient être

explorés dans de futures études (par exemple, la douleur lors des manœuvres de mobilisation des ischio-jambiers, la flexibilité, la force).

Parallèlement, nous avons montré l'importance de la méthode utilisée dans la précision de l'estimation du volume, paramètre particulièrement utile en pratique clinique courante, et très souvent utilisé en recherche clinique. Celui-ci, permettrait d'estimer le volume musculaire global des muscles de la cuisse, mais aussi chaque chef, ce qui est intéressant sur le plan de la rééducation, à la fois à la prise en charge initiale et dans le suivi. Le volume lésionnel de la lésion pourra à terme être aussi évalué de façon non supervisée, rapide et fiable, lors d'une approche quantitative non supervisée, réalisée en pratique courante lors d'une IRM réalisée lors d'une lésion des ischio-jambiers. L'association aux méthodes d'espacement des coupes combiné avec une interpolation peut s'avérer utile, dans des limites bien définies, afin de limiter le temps nécessaire à la machine pour réaliser le travail de segmentation non supervisée. Seule cette estimation systématique du volume musculaire en pratique courante permettra d'obtenir de facto de grandes bases de données, à la fois sur les lésions musculaires des ischio-jambiers, mais aussi sur les autres loges musculaires. Par ailleurs, toutes les pathologies musculaires sont concernées par cette estimation du volume, et il pourra facilement être mesuré l'évolution du volume musculaire lors de certaines pathologies et de différentes interventions (traitement médicamenteux, rééducation). Cependant, ces méthodes doivent être utilisées de manière bien contrôlée, et en ayant bien conscience de la fiabilité attendue. Une vérification humaine par un expert semble toutefois nécessaire afin de valider les segmentations réalisées. A terme, cela pourrait permettre de mieux comprendre l'origine des lésions des ischio-jambiers, en cherchant par exemple un déséquilibre musculaire. Cela pourrait être aussi utilisé dans le suivi, afin de tester si les méthodes de rééducation sont efficaces, là aussi sur le plan du volume musculaire. Cela permettrait là aussi de s'inscrire dans une approche personnalisée de la prise en charge du patient souffrant d'une lésion musculaire des ischio-jambiers. Cette estimation de volume des muscles de la cuisse pourra aussi rapidement être utilisée dans des protocoles de recherche, et permettre le suivi du volume musculaire lors de protocoles de rééducation musculaire ou d'évaluation d'un entraînement sportif particulier. Dans d'autres domaines, elle pourra aussi être utilisée pour le diagnostic et le suivi des pathologies neuromusculaires, avec une approche là aussi quantitative de la variation de volume musculaire, intéressante à la fois lors du diagnostic de

la pathologie mais aussi dans le suivi et l'évaluation de l'efficacité des traitements et de la rééducation mise en place. Elle pourra permettre de quantifier en routine d'autres paramètres, tels que la portion grasseuse à l'intérieur du muscle ou l'œdème musculaire (Ding et al. 2020). Pour cela, il faut à la fois que ces méthodes aient une excellente fiabilité, à commencer sur le plan de la segmentation, mais aussi sur l'évaluation des paramètres recherchés. De plus, les segmentations non supervisées par machine learning, est la première étape indispensable pour pouvoir établir une approche quantitative. Or, nous avons montré la difficulté sur certaines zones de la structure du muscle, notamment les extrémités (zones de jonction tendino-musculaires parfois très difficiles à individualiser), mais aussi en intermusculaire. Dans notre population de sportifs, avec des muscles très trophiques et avec très peu de portion grasseuse, cette difficulté est maximale. Toutefois, les erreurs induites ont moins de conséquences sur l'estimation du volume musculaire que sur la fiabilité de l'estimation de paramètres quantitatifs. Il faudra ainsi rester très vigilant à la fiabilité des résultats quantitatifs de ces méthodes. L'utilisation de ces méthodes de segmentation non supervisée permettra à terme au chercheur de s'affranchir de la longue et fastidieuse étape de segmentation manuelle. Leur utilisation en pratique clinique courante sera possible toutefois sous réserve de pouvoir transposer ces méthodes sur d'autres machines IRM avec des champs magnétiques différents et/ou avec des paramètres de séquence différentes. La possibilité d'obtenir les volumes musculaires de chacun des chefs musculaires de la cuisse de manière non supervisée et fiable permettra d'ouvrir un champ nouveau à la fois en recherche clinique et sur son applicabilité en routine clinique quotidienne.

VI-Conclusion générale

Nous avons donc montré le polymorphisme remnographique des lésions musculaires des ischio-jambiers, ainsi que l'importante hétérogénéité de leur description. Grâce à la mise en place de la cohorte prospective multicentrique HAMMER (HAMstring Mechanism iRM), nous avons ainsi pu mettre en évidence un lien entre un paramètre clinique (la douleur au moment de la lésion) et le volume de la lésion. Nous avons aussi montré que les lésions à mécanisme d'étirement sont plus à même d'être responsable de lésions à volume lésionnel important. De plus, nous avons mis en évidence que plusieurs données cliniques et remnographiques sont des facteurs de risque de récurrence. Ainsi, cela permet de mieux individualiser les lésions musculaires des ischio-jambiers comme des entités à part entière, et non pas comme une seule et même lésion. Cela va permettre de pouvoir préciser la prise en charge pour chacune de ces entités, à la fois sur le plan de l'estimation du temps de retour au sport, mais aussi sur le plan de la rééducation pour limiter au mieux le risque de récurrence. Parallèlement, nous avons évalué la fiabilité des méthodes d'estimation du volume musculaire utilisées dans la littérature, et notamment l'espacement des coupes, afin d'en montrer l'intérêt mais aussi leurs limites d'utilisation. Ensuite, nous avons développé des méthodes de segmentations non supervisées par machine learning sur les muscles de la cuisse, que nous avons appliquées à des patients de la cohorte HAMMER. Enfin, nous avons comparé la fiabilité de ces segmentations non supervisées en terme de qualité de segmentation et d'estimation du volume musculaire, montrant leur efficacité mais aussi leurs limites, notamment aux extrémités et aux zones de jonction muscle/tendon. Ces méthodes, dont la précision devrait continuer à s'améliorer avec le temps, pourront être une aide précieuse en recherche, à la fois pour les lésions musculaires des ischio-jambiers mais aussi pour d'autres pathologies et d'autres groupes musculaires. A terme, elles pourront être utilisées en pratique clinique courante, permettant une approche quantitative immédiate, à la fois sur le volume musculaire aussi sur d'autres variables, utile à la fois en terme de diagnostic et de pronostic pour différentes pathologies musculaires. La poursuite de la recherche sur les lésions musculaires des ischio-jambiers semble indispensable afin de pouvoir mieux individualiser ses différentes entités, et donc d'améliorer la personnalisation de leurs prises en charge.

Références bibliographiques

- Agosti A, Shaqiri E, Paoletti M, et al. Deep learning for automatic segmentation of thigh and leg muscles. *MAGMA*. Published online October 19, 2021. doi:10.1007/s10334-021-00967-4
- Al Attar WSA, Soomro N, Sinclair PJ, Pappas E, Sanders RH. Effect of Injury Prevention Programs that Include the Nordic Hamstring Exercise on Hamstring Injury Rates in Soccer Players: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*. 2017;47(5):907-916. doi:10.1007/s40279-016-0638-2
- Albu AB, Beugeling T, Laurendeau D. A morphology-based approach for interslice interpolation of anatomical slices from volumetric images. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2008;55(8):2022-2038. doi:10.1109/TBME.2008.921158
- Aldrich JE. Basic physics of ultrasound imaging. *Crit Care Med*. 2007;35(5 Suppl):S131-137. doi:10.1097/01.CCM.0000260624.99430.22
- Alom MZ, Taha TM, Yakopcic C, et al. A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. *Electronics*. 2019;8(3):292. doi:10.3390/electronics8030292
- Alonso JM, Edouard P, Fischetto G, Adams B, Depiesse F, Mountjoy M. Determination of future prevention strategies in elite track and field: analysis of Daegu 2011 IAAF Championships injuries and illnesses surveillance. *Br J Sports Med*. 2012;46(7):505-514. doi:10.1136/bjsports-2012-091008
- Alzubaidi L, Zhang J, Humaidi AJ, et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*. 2021;8(1):53. doi:10.1186/s40537-021-00444-8
- Arnason A, Andersen TE, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scand J Med Sci Sports*. 2008;18(1):40-48. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00634.x
- Asakawa DS, Blemker SS, Gold GE, Delp SL. In vivo motion of the rectus femoris muscle after tendon transfer surgery. *J Biomech*. 2002;35(8):1029-1037. doi:10.1016/s0021-9290(02)00048-9
- Askling C, Karlsson J, Thorstensson A. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scand J Med Sci Sports*. 2003;13(4):244-250. doi:10.1034/j.1600-0838.2003.00312.x
- 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*. 2010;18(12):1798-1803. doi:10.1007/s00167-010-1265-3
- Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Acute first-time hamstring strains during

- high-speed running: a longitudinal study including clinical and magnetic resonance imaging findings. *Am J Sports Med.* 2007;35(2):197-206.
doi:10.1177/0363546506294679
- Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Acute first-time hamstring strains during slow-speed stretching: clinical, magnetic resonance imaging, and recovery characteristics. *Am J Sports Med.* 2007;35(10):1716-1724.
doi:10.1177/0363546507303563
- Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Proximal hamstring strains of stretching type in different sports: injury situations, clinical and magnetic resonance imaging characteristics, and return to sport. *Am J Sports Med.* 2008;36(9):1799-1804.
doi:10.1177/0363546508315892
- Askling CM, Tengvar M, Tarassova O, Thorstensson A. Acute hamstring injuries in Swedish elite sprinters and jumpers: a prospective randomised controlled clinical trial comparing two rehabilitation protocols. *Br J Sports Med.* 2014;48(7):532-539.
doi:10.1136/bjsports-2013-093214
- Askling CM, Tengvar M, Thorstensson A. Acute hamstring injuries in Swedish elite football: a prospective randomised controlled clinical trial comparing two rehabilitation protocols. *Br J Sports Med.* 2013;47(15):953-959. doi:10.1136/bjsports-2013-092165
- Balius R, Pedret C, Iriarte I, Sáiz R, Cerezal L. Sonographic landmarks in hamstring muscles. *Skeletal Radiol.* 2019;48(11):1675-1683. doi:10.1007/s00256-019-03208-x
- Barnouin Y, Butler-Browne G, Voit T, et al. Manual segmentation of individual muscles of the quadriceps femoris using MRI: a reappraisal. *J Magn Reson Imaging.* 2014;40(1):239-247. doi:10.1002/jmri.24370
- Baron JE, Parker EA, Duchman KR, Westermann RW. Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review. *Orthop J Sports Med.* 2020;8(6):2325967120930296.
doi:10.1177/2325967120930296
- Baumgart C, Grim C, Heiss R, Ehrenstein P, Freiwald J, Hoppe MW. Rehabilitation after a Complete Avulsion of the Proximal Rectus Femoris Muscle: Considerations from a Case Report. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(16):8727. doi:10.3390/ijerph18168727
- Becciolini M, Bonacchi G, Bianchi S. Ultrasound Features of the Proximal Hamstring Muscle-Tendon-Bone Unit. *J Ultrasound Med.* 2019;38(5):1367-1382. doi:10.1002/jum.14804
- Behan FP, Maden-Wilkinson TM, Pain MTG, Folland JP. Sex differences in muscle morphology of the knee flexors and knee extensors. *PLoS One.* 2018;13(1):e0190903.
doi:10.1371/journal.pone.0190903
- Beltran L, Ghazikhanian V, Padron M, Beltran J. The proximal hamstring muscle-tendon-bone unit: a review of the normal anatomy, biomechanics, and pathophysiology. *Eur J Radiol.* 2012;81(12):3772-3779. doi:10.1016/j.ejrad.2011.03.099

- Besson JM. [The complexity of physiopharmacologic aspects of pain]. *Drugs*. 1997;53 Suppl 2:1-9. doi:10.2165/00003495-199700532-00004
- Birchmeier T, Lisee C, Kane K, Brazier B, Triplett A, Kuenze C. Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review. *J Orthop Res*. 2020;38(3):598-608. doi:10.1002/jor.24489
- Bisciotti GN, Chamari K, Cena E, et al. Hamstring Injuries Prevention in Soccer: A Narrative Review of Current Literature. *Joints*. 2019;7(3):115-126. doi:10.1055/s-0040-1712113
- Biz C, Nicoletti P, Baldin G, Bragazzi NL, Crimì A, Ruggieri P. Hamstring Strain Injury (HSI) Prevention in Professional and Semi-Professional Football Teams: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(16):8272. doi:10.3390/ijerph18168272
- Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986;1(8476):307-310.
- Bourne MN, Opar DA, Williams MD, Al Najjar A, Shield AJ. Muscle activation patterns in the Nordic hamstring exercise: Impact of prior strain injury. *Scand J Med Sci Sports*. 2016;26(6):666-674. doi:10.1111/sms.12494
- Bourne MN, Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Eccentric Knee Flexor Strength and Risk of Hamstring Injuries in Rugby Union: A Prospective Study. *Am J Sports Med*. 2015;43(11):2663-2670. doi:10.1177/0363546515599633
- Bourne MN, Williams MD, Opar DA, Al Najjar A, Kerr GK, Shield AJ. Impact of exercise selection on hamstring muscle activation. *Br J Sports Med*. 2017;51(13):1021-1028. doi:10.1136/bjsports-2015-095739
- Brandser EA, el-Khoury GY, Kathol MH, Callaghan JJ, Tearse DS. Hamstring injuries: radiographic, conventional tomographic, CT, and MR imaging characteristics. *Radiology*. 1995;197(1):257-262. doi:10.1148/radiology.197.1.7568833
- Brooks JHM, Fuller CW, Kemp SPT, Reddin DB. A prospective study of injuries and training amongst the England 2003 Rugby World Cup squad. *Br J Sports Med*. 2005;39(5):288-293. doi:10.1136/bjism.2004.013391
- Brooks JHM, Fuller CW, Kemp SPT, Reddin DB. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am J Sports Med*. 2006;34(8):1297-1306. doi:10.1177/0363546505286022
- Buckthorpe M, Danelon F, La Rosa G, Nanni G, Stride M, Della Villa F. Recommendations for Hamstring Function Recovery After ACL Reconstruction. *Sports Med*. 2021;51(4):607-624. doi:10.1007/s40279-020-01400-x
- Campbell SE, Adler R, Sofka CM. Ultrasound of muscle abnormalities. *Ultrasound Q*. 2005;21(2):87-94; quiz 150, 153-154.

- Chan O, Del Buono A, Best TM, Maffulli N. Acute muscle strain injuries: a proposed new classification system. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20(11):2356-2362.
- Chang JS, Kayani B, Plastow R, Singh S, Magan A, Haddad FS. Management of hamstring injuries: current concepts review. *Bone Joint J.* 2020;102-B(10):1281-1288. doi:10.1302/0301-620X.102B10.BJJ-2020-1210.R1
- Chumanov ES, Schache AG, Heiderscheit BC, Thelen DG. Hamstrings are most susceptible to injury during the late swing phase of sprinting. *Br J Sports Med.* 2012;46(2):90. doi:10.1136/bjsports-2011-090176
- Cohen SB, Towers JD, Zoga A, et al. Hamstring injuries in professional football players: magnetic resonance imaging correlation with return to play. *Sports Health.* 2011;3(5):423-430. doi:10.1177/1941738111403107
- Connell DA, Schneider-Kolsky ME, Hoving JL, et al. Longitudinal study comparing sonographic and MRI assessments of acute and healing hamstring injuries. *AJR Am J Roentgenol.* 2004;183(4):975-984. doi:10.2214/ajr.183.4.1830975
- Constantin-Teodosiu D, Constantin D. Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue. *Int J Mol Sci.* 2021;22(21):11587. doi:10.3390/ijms222111587
- Crema MD, Godoy IRB, Abdalla RJ, de Aquino JS, Ingham SJM, Skaf AY. Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play. *Sports Health.* 2018;10(1):75-79. doi:10.1177/1941738117741471
- Crema MD, Guerhazi 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(4):317-322. doi:10.1016/j.jsams.2015.04.005
- Crema MD, Jarraya M, Engebretsen L, et al. Imaging-detected acute muscle injuries in athletes participating in the Rio de Janeiro 2016 Summer Olympic Games. *Br J Sports Med.* 2018;52(7):460-464. doi:10.1136/bjsports-2017-098247
- Crema MD, Yamada AF, Guerhazi A, Roemer FW, Skaf AY. Imaging techniques for muscle injury in sports medicine and clinical relevance. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2015;8(2):154-161. doi:10.1007/s12178-015-9260-4
- Croisier JL, Ganteaume S, Binet J, Genty M, Ferret JM. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *Am J Sports Med.* 2008;36(8):1469-1475. doi:10.1177/0363546508316764
- Cuthbert M, Ripley N, McMahon JJ, Evans M, Haff GG, Comfort P. The Effect of Nordic Hamstring Exercise Intervention Volume on Eccentric Strength and Muscle Architecture Adaptations: A Systematic Review and Meta-analyses. *Sports Med.* 2020;50(1):83-99. doi:10.1007/s40279-019-01178-7
- Dalton SL, Kerr ZY, Dompier TP. Epidemiology of Hamstring Strains in 25 NCAA Sports in the

- 2009-2010 to 2013-2014 Academic Years. *Am J Sports Med.* 2015;43(11):2671-2679. doi:10.1177/0363546515599631
- Danielsson A, Horvath A, Senorski C, et al. The mechanism of hamstring injuries - a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020;21(1):641. doi:10.1186/s12891-020-03658-8
- De Smet AA, Best TM. MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes. *AJR Am J Roentgenol.* 2000;174(2):393-399. doi:10.2214/ajr.174.2.1740393
- De Vos RJ, Reurink G, Goudswaard GJ, 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.* 2014;48(18):1377-1384. doi:10.1136/bjsports-2014-093737
- Delvaux F, Rochcongar P, Bruyère O, et al. Return-to-play criteria after hamstring injury: actual medicine practice in professional soccer teams. *J Sports Sci Med.* 2014;13(3):721-723.
- Deo RC. Machine Learning in Medicine. *Circulation.* 2015;132(20):1920-1930. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.115.001593
- Diemer WM, Winters M, Tol JL, Pas HIMFL, Moen MH. Incidence of Acute Hamstring Injuries in Soccer: A Systematic Review of 13 Studies Involving More Than 3800 Athletes With 2 Million Sport Exposure Hours. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2021;51(1):27-36. doi:10.2519/jospt.2021.9305
- Ding J, Cao P, Chang HC, Gao Y, Chan SHS, Vardhanabhuti V. Deep learning-based thigh muscle segmentation for reproducible fat fraction quantification using fat-water decomposition MRI. *Insights Imaging.* 2020;11(1):128. doi:10.1186/s13244-020-00946-8
- Dorn TW, Schache AG, Pandy MG. Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J Exp Biol.* 2012;215(Pt 11):1944-1956. doi:10.1242/jeb.064527
- Drace JE, Pelc NJ. Measurement of skeletal muscle motion in vivo with phase-contrast MR imaging. *J Magn Reson Imaging.* 1994;4(2):157-163. doi:10.1002/jmri.1880040211
- Dunlop G, Ardern CL, Andersen TE, et al. Return-to-Play Practices Following Hamstring Injury: A Worldwide Survey of 131 Premier League Football Teams. *Sports Med.* 2020;50(4):829-840. doi:10.1007/s40279-019-01199-2
- Edouard P, Branco P, Alonso JM. 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. *Br J Sports Med.* 2016;50(10):619-630. doi:10.1136/bjsports-2015-095559
- Edouard P, Hollander K, Navarro L, et al. Lower limb muscle injury location shift from

posterior lower leg to hamstring muscles with increasing discipline-related running velocity in international athletics championships. *J Sci Med Sport*. 2021;24(7):653-659. doi:10.1016/j.jsams.2021.02.006

Ekstrand J, Bengtsson H, Waldén M, Davison M, Khan KM, Hägglund M. 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. *Br J Sports Med*. 2022;57(5):292-298. doi:10.1136/bjsports-2021-105407

Ekstrand J, Hägglund M, Waldén M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am J Sports Med*. 2011;39(6):1226-1232. doi:10.1177/0363546510395879

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(2):112-117. doi:10.1136/bjsports-2011-090155

Ekstrand J, Lee JC, Healy JC. MRI findings and return to play in football: a prospective analysis of 255 hamstring injuries in the UEFA Elite Club Injury Study. *Br J Sports Med*. 2016;50(12):738-743. doi:10.1136/bjsports-2016-095974

Ekstrand J, Spreco A, Bengtsson H, Bahr R. Injury rates decreased in men's professional football: an 18-year prospective cohort study of almost 12 000 injuries sustained during 1.8 million hours of play. *Br J Sports Med*. Published online February 5, 2021. doi:10.1136/bjsports-2020-103159

Ekstrand J, Waldén M, Hägglund M. Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br J Sports Med*. 2016;50(12):731-737. doi:10.1136/bjsports-2015-095359

Erickson LN, Sherry MA. Rehabilitation and return to sport after hamstring strain injury. *J Sport Health Sci*. 2017;6(3):262-270. doi:10.1016/j.jshs.2017.04.001

Evangelidis PE, Massey GJ, Pain MTG, Folland JP. Strength and size relationships of the quadriceps and hamstrings with special reference to reciprocal muscle balance. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(3):593-600. doi:10.1007/s00421-015-3321-7

Farrow M, Biglands JD, Grainger AJ, et al. Quantitative MRI in myositis patients: comparison with healthy volunteers and radiological visual assessment. *Clin Radiol*. 2021;76(1):81.e1-81.e10. doi:10.1016/j.crad.2020.08.022

Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, et al. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn Reson Imaging*. 2012;30(9):1323-1341. doi:10.1016/j.mri.2012.05.001

Fee C, Sergot L, Kho J, Chakraverty J. Ultrasound assessment of the hamstrings complex of athletes with MRI correlation. *Clin Radiol*. 2022;77(5):337-344. doi:10.1016/j.crad.2022.01.049

- Fitzpatrick AC, Naylor AS, Myler P, Robertson C. A three-year epidemiological prospective cohort study of rugby league match injuries from the European Super League. *J Sci Med Sport*. 2018;21(2):160-165. doi:10.1016/j.jsams.2017.08.012
- Fletcher AN, Cheah JW, Nho SJ, Mather RC. Proximal Hamstring Injuries. *Clin Sports Med*. 2021;40(2):339-361. doi:10.1016/j.csm.2021.01.003
- Flores DV, Mejía Gómez C, Estrada-Castrillón M, Smitaman E, Pathria MN. MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance. *Radiographics*. 2018;38(1):124-148. doi:10.1148/rg.2018170072
- Fousekis K, Tsepis E, Poulmedis P, Athanasopoulos S, Vagenas G. Intrinsic risk factors of non-contact quadriceps and hamstring strains in soccer: a prospective study of 100 professional players. *Br J Sports Med*. 2011;45(9):709-714. doi:10.1136/bjism.2010.077560
- Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, et al. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf)*. 2014;210(3):642-654. doi:10.1111/apha.12225
- Franchi MV, Fitze DP, Hanimann J, Sarto F, Spörri J. Panoramic ultrasound vs. MRI for the assessment of hamstrings cross-sectional area and volume in a large athletic cohort. *Sci Rep*. 2020;10(1):14144. doi:10.1038/s41598-020-71123-6
- Francis P, Lyons M, Piasecki M, Mc Phee J, Hind K, Jakeman P. Measurement of muscle health in aging. *Biogerontology*. 2017;18(6):901-911. doi:10.1007/s10522-017-9697-5
- Freckleton G, Cook J, Pizzari T. The predictive validity of a single leg bridge test for hamstring injuries in Australian Rules Football Players. *Br J Sports Med*. 2014;48(8):713-717. doi:10.1136/bjsports-2013-092356
- Freckleton G, Pizzari T. Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2013;47(6):351-358. doi:10.1136/bjsports-2011-090664
- Fried T, Lloyd GJ. An overview of common soccer injuries. Management and prevention. *Sports Med*. 1992;14(4):269-275. doi:10.2165/00007256-199214040-00005
- Frouin A, Guenanten H, Sant GL, et al. Validity and Reliability of 3-D Ultrasound Imaging to Measure Hamstring Muscle and Tendon Volumes. *Ultrasound Med Biol*. Published online March 20, 2023:S0301-5629(23)00064-9. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2023.02.012
- Fukunaga T, Kawakami Y, Kuno S, Funato K, Fukashiro S. Muscle architecture and function in humans. *J Biomech*. 1997;30(5):457-463. doi:10.1016/s0021-9290(96)00171-6
- Fukunaga T, Miyatani M, Tachi M, Kouzaki M, Kawakami Y, Kanehisa H. Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*. 2001;172(4):249-255. doi:10.1046/j.1365-201x.2001.00867.x

- Gabbe BJ, Bennell KL, Finch CF, Wajswelner H, Orchard JW. Predictors of hamstring injury at the elite level of Australian football. *Scand J Med Sci Sports*. 2006;16(1):7-13. doi:10.1111/j.1600-0838.2005.00441.x
- Geirsson RT, Christie AD, Patel N. Ultrasound volume measurements comparing a prolate ellipsoid method with a parallel planimetric area method against a known volume. *J Clin Ultrasound*. 1982;10(7):329-332. doi:10.1002/jcu.1870100707
- Gibbs NJ, Cross TM, Cameron M, Houang MT. The accuracy of MRI in predicting recovery and recurrence of acute grade one hamstring muscle strains within the same season in Australian Rules football players. *J Sci Med Sport*. 2004;7(2):248-258. doi:10.1016/s1440-2440(04)80016-1
- Gibby WA. Basic principles of magnetic resonance imaging. *Neurosurg Clin N Am*. 2005;16(1):1-64. doi:10.1016/j.nec.2004.08.017
- Goldman LW. Principles of CT and CT technology. *J Nucl Med Technol*. 2007;35(3):115-128; quiz 129-130. doi:10.2967/jnmt.107.042978
- Gouttebauge V, Hughes Schwab BA, Vivian A, M M J Kerkhoffs G. Injuries, Matches Missed and the Influence of Minimum Medical Standards in the A-League Professional Football: A 5-Year Prospective Study. *Asian J Sports Med*. 2016;7(1):e31385. doi:10.5812/asjasm.31385
- Grange S, Grange R, Garnier P, et al. Boundary and vulnerability estimation of the internal borderzone using ischemic stroke lesion mapping. *Sci Rep*. 2020;10(1):1662. doi:10.1038/s41598-020-58480-y
- Grange S, Reurink G, Nguyen AQ, et al. Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review. *Sports Health*. Published online February 11, 2022:19417381211071010. doi:10.1177/19417381211071010
- Gray C, MacGillivray TJ, Eeley C, et al. Magnetic resonance imaging with k-means clustering objectively measures whole muscle volume compartments in sarcopenia/cancer cachexia. *Clin Nutr*. 2011;30(1):106-111. doi:10.1016/j.clnu.2010.07.012
- 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(18):1081-1088. doi:10.1136/bjsports-2019-100983
- Gronwald T, Klein C, Hoenig T, et al. Hamstring injury patterns in professional male football (soccer): a systematic video analysis of 52 cases. *Br J Sports Med*. 2022;56(3):165-171. doi:10.1136/bjsports-2021-104769
- Guerini H, Omoumi P, Guichoux F, et al. Fat Suppression with Dixon Techniques in Musculoskeletal Magnetic Resonance Imaging: A Pictorial Review. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2015;19(4):335-347. doi:10.1055/s-0035-1565913

- Guillodo Y, Here-Dorignac C, Thoribé B, et al. Clinical predictors of time to return to competition following hamstring injuries. *Muscles Ligaments Tendons J.* 2014;4(3):386-390.
- Guo Q, Dong F, Sun S, Ren X, Feng S, Gao BZ. Improved Rotating Kernel Transformation Based Contourlet Domain Image Denoising Framework. *Adv Multimed Inf Process - PCM 2013 (2013).* 2013;8294:146-157. doi:10.1007/978-3-319-03731-8_14
- H.-T.Nguyen et al. Robust multi-atlas MRI segmentation with corrective learning for quantification of local quadriceps muscles inflammation changes during a longitudinal study in athletes. : *International Society for Magnetic Resonance in Medicine.* 2018.
- Häggglund M, Waldén M, Ekstrand J. Previous injury as a risk factor for injury in elite football: a prospective study over two consecutive seasons. *Br J Sports Med.* 2006;40(9):767-772. doi:10.1136/bjsm.2006.026609
- Häggglund M, Waldén M, Magnusson H, Kristenson K, Bengtsson H, Ekstrand J. Injuries affect team performance negatively in professional football: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *Br J Sports Med.* 2013;47(12):738-742. doi:10.1136/bjsports-2013-092215
- Hallén A, Ekstrand J. Return to play following muscle injuries in professional footballers. *J Sports Sci.* 2014;32(13):1229-1236. doi:10.1080/02640414.2014.905695
- Hamilton B, Whiteley R, Almusa E, Roger B, Geertsema C, Tol JL. Excellent reliability for MRI grading and prognostic parameters in acute hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2014;48(18):1385-1387. doi:10.1136/bjsports-2013-092564
- Hamilton B, Wangensteen A, Whiteley R, et al. Cohen's MRI scoring system has limited value in predicting return to play. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(4):1288-1294. doi:10.1007/s00167-016-4403-8
- Hayden JA, Côté P, Bombardier C. Evaluation of the quality of prognosis studies in systematic reviews. *Ann Intern Med.* 2006;144(6):427-437. doi:10.7326/0003-4819-144-6-200603210-00010
- Hegyi A, Péter A, Finni T, Cronin NJ. Region-dependent hamstrings activity in Nordic hamstring exercise and stiff-leg deadlift defined with high-density electromyography. *Scand J Med Sci Sports.* 2018;28(3):992-1000. doi:10.1111/sms.13016
- Hickey J, Shield AJ, Williams MD, Opar DA. The financial cost of hamstring strain injuries in the Australian Football League. *Br J Sports Med.* 2014;48(8):729-730. doi:10.1136/bjsports-2013-092884
- Hickey JT, Opar DA, Weiss LJ, Heiderscheidt BC. Hamstring Strain Injury Rehabilitation. *J Athl Train.* 2022;57(2):125-135. doi:10.4085/1062-6050-0707.20
- 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.* 2017;47(7):1375-1387. doi:10.1007/s40279-016-0667-x
- Higashihara A, Ono T, Kubota J, Okuwaki T, Fukubayashi T. Functional differences in the activity of the hamstring muscles with increasing running speed. *J Sports Sci.* 2010;28(10):1085-1092. doi:10.1080/02640414.2010.494308
- Hioki M, Kanehira N, Koike T, et al. Age-related changes in muscle volume and intramuscular fat content in quadriceps femoris and hamstrings. *Exp Gerontol.* 2020;132:110834. doi:10.1016/j.exger.2020.110834
- Hogrel JY, Barnouin Y, Azzabou N, et al. NMR imaging estimates of muscle volume and intramuscular fat infiltration in the thigh: variations with muscle, gender, and age. *Age (Dordr).* 2015;37(3):9798. doi:10.1007/s11357-015-9798-5
- Islam S, Kanavati F, Arain Z, et al. Fully automated deep-learning section-based muscle segmentation from CT images for sarcopenia assessment. *Clin Radiol.* 2022;77(5):e363-e371. doi:10.1016/j.crad.2022.01.036
- Iversen E, Røstad V, Larmo A. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Sport Health Sci.* 2016;5(1):115-118. doi:10.1016/j.jshs.2014.12.005
- Jacobsen P, Witvrouw E, Muxart P, Tol JL, Whiteley R. A combination of initial and follow-up physiotherapist examination predicts physician-determined time to return to play after hamstring injury, with no added value of MRI. *Br J Sports Med.* 2016;50(7):431-439. doi:10.1136/bjsports-2015-095073
- Jokela A, Valle X, Kosola J, et al. Mechanisms of Hamstring Injury in Professional Soccer Players: Video Analysis and Magnetic Resonance Imaging Findings. *Clin J Sport Med.* 2023;33(3):217-224. doi:10.1097/JSM.0000000000001109
- Kemnitz J, Baumgartner CF, Eckstein F, et al. Clinical evaluation of fully automated thigh muscle and adipose tissue segmentation using a U-Net deep learning architecture in context of osteoarthritic knee pain. *MAGMA.* 2020;33(4):483-493. doi:10.1007/s10334-019-00816-5
- Kenneally-Dabrowski CJB, Brown NAT, Lai AKM, Perriman D, Spratford W, Serpell BG. Late swing or early stance? A narrative review of hamstring injury mechanisms during high-speed running. *Scand J Med Sci Sports.* 2019;29(8):1083-1091. doi:10.1111/sms.13437
- Kent-Braun JA, McCully KK, Chance B. Metabolic effects of training in humans: a ³¹P-MRS study. *J Appl Physiol (1985).* 1990;69(3):1165-1170. doi:10.1152/jappl.1990.69.3.1165
- Kilroe SP, Fulford J, Jackman SR, VAN Loon LJC, Wall BT. Temporal Muscle-specific Disuse Atrophy during One Week of Leg Immobilization. *Med Sci Sports Exerc.* 2020;52(4):944-954. doi:10.1249/MSS.0000000000002200
- Koulouris G, Connell D. Evaluation of the hamstring muscle complex following acute injury.

- Skeletal Radiol.* 2003;32(10):582-589. doi:10.1007/s00256-003-0674-5
- Koulouris G, Connell D. Hamstring muscle complex: an imaging review. *Radiographics.* 2005;25(3):571-586. doi:10.1148/rg.253045711
- Koulouris G, Connell DA, Brukner P, Schneider-Kolsky M. Magnetic resonance imaging parameters for assessing risk of recurrent hamstring injuries in elite athletes. *Am J Sports Med.* 2007;35(9):1500-1506. doi:10.1177/0363546507301258
- Krasnov D, Davis D, Malott K, Chen Y, Shi X, Wong A. Fuzzy C-Means Clustering: A Review of Applications in Breast Cancer Detection. *Entropy (Basel).* 2023;25(7):1021. doi:10.3390/e25071021
- Kulas AS, Schmitz RJ, Shultz SJ, et al. Bilateral quadriceps and hamstrings muscle volume asymmetries in healthy individuals. *J Orthop Res.* 2018;36(3):963-970. doi:10.1002/jor.23664
- Kumazaki T, Ehara Y, Sakai T. Anatomy and physiology of hamstring injury. *Int J Sports Med.* 2012;33(12):950-954. doi:10.1055/s-0032-1311593
- Labareyre (de) H., Roger B., Thelen P. Evaluation des lésions musculaires récentes du membre inférieur : clinique et imagerie. In: *Panorama En Traumatologie Du Sport Paris.* Masson. ; 2002.
- Le Troter A, Fouré A, Guye M, et al. Volume measurements of individual muscles in human quadriceps femoris using atlas-based segmentation approaches. *MAGMA.* 2016;29(2):245-257. doi:10.1007/s10334-016-0535-6
- Lemes IR, Pinto RZ, Lage VN, et al. Do exercise-based prevention programmes reduce non-contact musculoskeletal injuries in football (soccer)? A systematic review and meta-analysis with 13 355 athletes and more than 1 million exposure hours. *Br J Sports Med.* 2021;55(20):1170-1178. doi:10.1136/bjsports-2020-103683
- Linklater JM, Hamilton B, Carmichael J, Orchard J, Wood DG. Hamstring injuries: anatomy, imaging, and intervention. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2010;14(2):131-161. doi:10.1055/s-0030-1253157
- Lins CF, Salmon CEG, Nogueira-Barbosa MH. Applications of the Dixon technique in the evaluation of the musculoskeletal system. *Radiol Bras.* 2021;54(1):33-42. doi:10.1590/0100-3984.2019.0086
- Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal.* 2017;42:60-88. doi:10.1016/j.media.2017.07.005
- Liu J, Lewton KL, Colletti PM, Powers CM. Hip Adduction during Running: Influence of Sex, Hip Abductor Strength and Activation, and Pelvis and Femur Morphology. *Med Sci Sports Exerc.* 2021;53(11):2346-2353. doi:10.1249/MSS.0000000000002721
- Liu W, Wang Z, Liu X, Zeng N, Liu Y, Alsaadi FE. A survey of deep neural network architectures

- and their applications. *Neurocomputing*. 2017;234:11-26.
doi:10.1016/j.neucom.2016.12.038
- Longo UG, Loppini M, Berton A, Marinozzi A, Maffulli N, Denaro V. The FIFA 11+ program is effective in preventing injuries in elite male basketball players: a cluster randomized controlled trial. *Am J Sports Med*. 2012;40(5):996-1005.
doi:10.1177/0363546512438761
- Louis LJ. Musculoskeletal ultrasound intervention: principles and advances. *Radiol Clin North Am*. 2008;46(3):515-533, vi. doi:10.1016/j.rcl.2008.02.003
- Macdonald B, McAleer S, Kelly S, Chakraverty R, Johnston M, Pollock N. Hamstring rehabilitation in elite track and field athletes: applying the British Athletics Muscle Injury Classification in clinical practice. *Br J Sports Med*. 2019;53(23):1464-1473.
doi:10.1136/bjsports-2017-098971
- Mack CD, Kent RW, Coughlin MJ, et al. Incidence of Lower Extremity Injury in the National Football League: 2015 to 2018. *Am J Sports Med*. 2020;48(9):2287-2294.
doi:10.1177/0363546520922547
- Mackey AL, Kjaer M. The breaking and making of healthy adult human skeletal muscle in vivo. *Skelet Muscle*. 2017;7(1):24. doi:10.1186/s13395-017-0142-x
- Maden-Wilkinson TM, Balshaw TG, Massey GJ, Folland JP. What makes long-term resistance-trained individuals so strong? A comparison of skeletal muscle morphology, architecture, and joint mechanics. *J Appl Physiol (1985)*. 2020;128(4):1000-1011.
doi:10.1152/jappphysiol.00224.2019
- 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*. 2011;39(2):304-310.
doi:10.1177/0363546510382857
- Mallinson JE, Taylor T, Constantin-Teodosiu D, et al. Longitudinal hypertrophic and transcriptional responses to high-load eccentric-concentric vs concentric training in males. *Scand J Med Sci Sports*. 2020;30(11):2101-2115. doi:10.1111/sms.13791
- Mandić M, Rullman E, Widholm P, et al. Automated assessment of regional muscle volume and hypertrophy using MRI. *Sci Rep*. 2020;10(1):2239. doi:10.1038/s41598-020-59267-x
- Maniar N, Carmichael DS, Hickey JT, et al. Incidence and prevalence of hamstring injuries in field-based team sports: a systematic review and meta-analysis of 5952 injuries from over 7 million exposure hours. *Br J Sports Med*. 2023;57(2):109-116.
doi:10.1136/bjsports-2021-104936
- Mathur S, Takai KP, Macintyre DL, Reid D. Estimation of thigh muscle mass with magnetic resonance imaging in older adults and people with chronic obstructive pulmonary disease. *Phys Ther*. 2008;88(2):219-230. doi:10.2522/ptj.20070052
- Matthews JR, Sonnier JH, Prodoehl JP, et al. Distal Hamstring Muscle Injuries. *JBJS Rev*.

2022;10(3). doi:10.2106/JBJS.RVW.21.00215

McCormick M, Liu X, Jomier J, Marion C, Ibanez L. ITK: enabling reproducible research and open science. *Front Neuroinform*. 2014;8:13. doi:10.3389/fninf.2014.00013

McCrary JM, Ackermann BJ, Halaki M. A systematic review of the effects of upper body warm-up on performance and injury. *Br J Sports Med*. 2015;49(14):935-942. doi:10.1136/bjsports-2014-094228

Mendez-Villanueva A, Suarez-Arrones L, Rodas G, et al. MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players. *PLoS One*. 2016;11(9):e0161356. doi:10.1371/journal.pone.0161356

Mendiguchia J, Martinez-Ruiz E, Edouard P, et al. A Multifactorial, Criteria-based Progressive Algorithm for Hamstring Injury Treatment. *Med Sci Sports Exerc*. 2017;49(7):1482-1492. doi:10.1249/MSS.0000000000001241

Mense S. The pathogenesis of muscle pain. *Curr Pain Headache Rep*. 2003;7(6):419-425. doi:10.1007/s11916-003-0057-6

Millan MJ. The induction of pain: an integrative review. *Prog Neurobiol*. 1999;57(1):1-164. doi:10.1016/s0301-0082(98)00048-3

Moher D, Pham B, Lawson ML, Klassen TP. The inclusion of reports of randomised trials published in languages other than English in systematic reviews. *Health Technol Assess*. 2003;7(41):1-90. doi:10.3310/hta7410

Monti E, Franchi MV, Badiali F, Quinlan JI, Longo S, Narici MV. The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training. *Front Physiol*. 2020;11:946. doi:10.3389/fphys.2020.00946

Morin JB, Gimenez P, Edouard P, et al. Sprint Acceleration Mechanics: The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production. *Front Physiol*. 2015;6:404. doi:10.3389/fphys.2015.00404

Morse CI, Degens H, Jones DA. The validity of estimating quadriceps volume from single MRI cross-sections in young men. *Eur J Appl Physiol*. 2007;100(3):267-274. doi:10.1007/s00421-007-0429-4

Mühlenfeld N, Steendahl IB, Berthold DP, et al. Assessment of muscle volume using magnetic resonance imaging (MRI) in football players after hamstring injuries. *Eur J Sport Sci*. Published online June 28, 2021:1-9. doi:10.1080/17461391.2021.1942226

Nescolarde L, Yanguas J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J, Rodas G. Effects of muscle injury severity on localized bioimpedance measurements. *Physiol Meas*. 2015;36(1):27-42. doi:10.1088/0967-3334/36/1/27

Nguyen A, Grange S, Court L, Barral FG, Edouard P. Localisation en IRM des lésions musculaires des ischio-jambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec

lemécanisme lésionnel : résultats préliminaires de l'étude HAMMER (Hamstring mechanics and MRI). *Journal de Traumatologie du Sport*. Published online June 1, 2019. doi:36(2):86-95

Nguyen HT, Grenier T, Leporq B, et al. Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon. *Med Sci Sports Exerc*. 2021;53(4):869-881. doi:10.1249/MSS.0000000000002535

Nordez A, Jolivet E, Südhoff I, Bonneau D, de Guise JA, Skalli W. Comparison of methods to assess quadriceps muscle volume using magnetic resonance imaging. *J Magn Reson Imaging*. 2009;30(5):1116-1123. doi:10.1002/jmri.21867

Nuell S, Illera-Domínguez V, Carmona G, et al. Sex differences in thigh muscle volumes, sprint performance and mechanical properties in national-level sprinters. *PLoS One*. 2019;14(11):e0224862. doi:10.1371/journal.pone.0224862

O'Sullivan L, Preszler J, Tanaka M. Hamstring Injury Rehabilitation and Prevention in the Female Athlete. *Int J Sports Phys Ther*. 2022;17(6):1184-1193. doi:10.26603/001c.38254

Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring Strain Injuries. *Sports Med*. 2012;42(3):209-226. doi:10.2165/11594800-000000000-00000

Opar DA, Williams MD, Timmins RG, Hickey J, Duhig SJ, Shield AJ. The effect of previous hamstring strain injuries on the change in eccentric hamstring strength during preseason training in elite Australian footballers. *Am J Sports Med*. 2015;43(2):377-384. doi:10.1177/0363546514556638

Opar DA, Williams MD, Timmins RG, Hickey J, Duhig SJ, Shield AJ. Eccentric hamstring strength and hamstring injury risk in Australian footballers. *Med Sci Sports Exerc*. 2015;47(4):857-865. doi:10.1249/MSS.0000000000000465

Orchard J, Seward H. Epidemiology of injuries in the Australian Football League, seasons 1997-2000. *Br J Sports Med*. 2002;36(1):39-44. doi:10.1136/bjsm.36.1.39

Padmapriya T, Sriramakrishnan P, Kalaiselvi T, Somasundaram K. Advancements of MRI-based Brain Tumor Segmentation from Traditional to Recent Trends: A Review. *Curr Med Imaging*. 2022;18(12):1261-1275. doi:10.2174/1573405617666211215111937

Panisset MG, El-Ansary D, Dunlop SA, et al. Factors influencing thigh muscle volume change with cycling exercises in acute spinal cord injury - a secondary analysis of a randomized controlled trial. *J Spinal Cord Med*. Published online September 24, 2020:1-12. doi:10.1080/10790268.2020.1815480

Pappas GP, Asakawa DS, Delp SL, Zajac FE, Drace JE. Nonuniform shortening in the biceps brachii during elbow flexion. *J Appl Physiol (1985)*. 2002;92(6):2381-2389. doi:10.1152/jappphysiol.00843.2001

Patel A, Chakraverty J, Pollock N, Chakraverty R, Suokas AK, James SL. British athletics muscle injury classification: a reliability study for a new grading system. *Clin Radiol*.

2015;70(12):1414-1420. doi:10.1016/j.crad.2015.08.009

Paton BM, Court N, Giakoumis M, et al. London International Consensus and Delphi study on hamstring injuries part 1: classification. *Br J Sports Med*. Published online January 17, 2023;bjsports-2021-105371. doi:10.1136/bjsports-2021-105371

Paton BM, Court N, Giakoumis M, et al. London International Consensus and Delphi study on hamstring injuries part 1: classification. *Br J Sports Med*. Published online January 17, 2023;bjsports-2021-105371. doi:10.1136/bjsports-2021-105371

Paton BM, Read P, van Dyk N, et al. London International Consensus and Delphi study on hamstring injuries part 3: rehabilitation, running and return to sport. *Br J Sports Med*. 2023;57(5):278-291. doi:10.1136/bjsports-2021-105384

Pedret C. Hamstring Muscle Injuries: MRI and Ultrasound for Diagnosis and Prognosis. *J Belg Soc Radiol*. 2021;105(1):91. doi:10.5334/jbsr.2617

Pettrons P. Ultrasound of muscles. *Eur Radiol*. 2002;12(1):35-43. doi:10.1007/s00330-001-1164-6

Pieters D, Wezenbeek E, Schuermans J, Witvrouw E. Return to Play After a Hamstring Strain Injury: It is Time to Consider Natural Healing. *Sports Med*. 2021;51(10):2067-2077. doi:10.1007/s40279-021-01494-x

Plastow R, Kerkhoffs GMMJ, Wood D, et al. London International Consensus and Delphi study on hamstring injuries part 2: operative management. *Br J Sports Med*. 2023;57(5):266-277. doi:10.1136/bjsports-2021-105383

Pollock N, James SLJ, Lee JC, Chakraverty R. British athletics muscle injury classification: a new grading system. *Br J Sports Med*. 2014;48(18):1347-1351. doi:10.1136/bjsports-2013-093302

Pollock N, Patel A, Chakraverty J, Suokas A, James SLJ, Chakraverty R. Time to return to full training is delayed and recurrence rate is higher in intratendinous ('c') acute hamstring injury in elite track and field athletes: clinical application of the British Athletics Muscle Injury Classification. *Br J Sports Med*. 2016;50(5):305-310. doi:10.1136/bjsports-2015-094657

Pomeranz SJ, Heidt RS. MR imaging in the prognostication of hamstring injury. Work in progress. *Radiology*. 1993;189(3):897-900. doi:10.1148/radiology.189.3.8234722

Pons C, Borotikar B, Garetier M, et al. Quantifying skeletal muscle volume and shape in humans using MRI: A systematic review of validity and reliability. *PLoS One*. 2018;13(11):e0207847. doi:10.1371/journal.pone.0207847

Rees H, McCarthy Persson U, Delahunt E, Boreham C, Blake C. The burden of injury in field hockey: A secondary analysis of prospective cohort data. *Scand J Med Sci Sports*. 2021;31(4):884-893. doi:10.1111/sms.13904

- Rettig AC, Meyer S, Bhadra AK. Platelet-Rich Plasma in Addition to Rehabilitation for Acute Hamstring Injuries in NFL Players: Clinical Effects and Time to Return to Play. *Orthop J Sports Med.* 2013;1(1):2325967113494354. doi:10.1177/2325967113494354
- Reurink G, Whiteley R, Tol JL. Hamstring injuries and predicting return to play: “bye-bye MRI?” *Br J Sports Med.* 2015;49(18):1162-1163. doi:10.1136/bjsports-2015-094771
- Reurink G, Almusa E, Goudswaard GJ, et al. No association between fibrosis on magnetic resonance imaging at return to play and hamstring reinjury risk. *Am J Sports Med.* 2015;43(5):1228-1234. doi:10.1177/0363546515572603
- Reurink G, Brillman EG, de Vos RJ, et al. Magnetic resonance imaging in acute hamstring injury: can we provide a return to play prognosis? *Sports Med.* 2015;45(1):133-146. doi:10.1007/s40279-014-0243-1
- Reurink G, Goudswaard GJ, Tol JL, et al. MRI observations at return to play of clinically recovered hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2014;48(18):1370-1376. doi:10.1136/bjsports-2013-092450
- Roberts N, Cruz-Orive LM, Reid NM, Brodie DA, Bourne M, Edwards RH. Unbiased estimation of human body composition by the Cavalieri method using magnetic resonance imaging. *J Microsc.* 1993;171(Pt 3):239-253. doi:10.1111/j.1365-2818.1993.tb03381.x
- Rodineau J. In: *Classification Clinique Des Lésions Récentes*. Vol Muscle traumatique et mécanique Paris. Masson; 2005.
- Ross R, Rissanen J, Pedwell H, Clifford J, Shragge P. Influence of diet and exercise on skeletal muscle and visceral adipose tissue in men. *J Appl Physiol (1985).* 1996;81(6):2445-2455. doi:10.1152/jappl.1996.81.6.2445
- Rubin DA. Imaging diagnosis and prognostication of hamstring injuries. *AJR Am J Roentgenol.* 2012;199(3):525-533. doi:10.2214/AJR.12.8784
- Rudisill SS, Varady NH, Kucharik MP, Eberlin CT, Martin SD. Evidence-Based Hamstring Injury Prevention and Risk Factor Management: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Am J Sports Med.* Published online April 6, 2022:3635465221083998. doi:10.1177/03635465221083998
- Rush JL, Norte GE, Lepley AS. Limb differences in hamstring muscle function and morphology after anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther Sport.* 2020;45:168-175. doi:10.1016/j.ptsp.2020.06.012
- Safar Cherati A, Lotfian S, Jamshidi A, Sanjari MA, Razi M. The Effect of Increasing Volume of Exercise on Activation Pattern of Vastus Medialis and Lateralis and its Correlation With Anterior Knee Pain in Karate Elites. *Asian J Sports Med.* 2016;7(3):e35289. doi:10.5812/asjasm.35289
- Schache AG, Dorn TW, Blanch PD, Brown NAT, Pandy MG. Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(4):647-658.

doi:10.1249/MSS.0b013e318236a3d2

- Schmitt B, Tim T, McHugh M. Hamstring injury rehabilitation and prevention of reinjury using lengthened state eccentric training: a new concept. *Int J Sports Phys Ther.* 2012;7(3):333-341.
- Schneider-Kolsky ME, Hoving JL, Warren P, Connell DA. A comparison between clinical assessment and magnetic resonance imaging of acute hamstring injuries. *Am J Sports Med.* 2006;34(6):1008-1015. doi:10.1177/0363546505283835
- Schueler BA. Clinical applications of basic x-ray physics principles. *Radiographics.* 1998;18(3):731-744; quiz 729. doi:10.1148/radiographics.18.3.9599394
- Sciascia A, Waldecker J, Jacobs C. Pain Catastrophizing in College Athletes. *J Sport Rehabil.* 2020;29(2):168-173. doi:10.1123/jsr.2018-0137
- Shield AJ, Bourne MN. Hamstring Injury Prevention Practices in Elite Sport: Evidence for Eccentric Strength vs. Lumbo-Pelvic Training. *Sports Med.* 2018;48(3):513-524. doi:10.1007/s40279-017-0819-7
- Silder A, Sherry MA, Sanfilippo J, Tuite MJ, Hetzel SJ, Heiderscheid BC. Clinical and morphological changes following 2 rehabilitation programs for acute hamstring strain injuries: a randomized clinical trial. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2013;43(5):284-299. doi:10.2519/jospt.2013.4452
- Slavotinek JP, Verrall GM, Fon GT. Hamstring injury in athletes: using MR imaging measurements to compare extent of muscle injury with amount of time lost from competition. *AJR Am J Roentgenol.* 2002;179(6):1621-1628. doi:10.2214/ajr.179.6.1791621
- Söderman K, Alfredson H, Pietilä T, Werner S. Risk factors for leg injuries in female soccer players: a prospective investigation during one out-door season. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2001;9(5):313-321. doi:10.1007/s001670100228
- Sotiras A, Davatzikos C, Paragios N. Deformable medical image registration: a survey. *IEEE Trans Med Imaging.* 2013;32(7):1153-1190. doi:10.1109/TMI.2013.2265603
- Souza J de, Gottfried C. Muscle injury: review of experimental models. *J Electromyogr Kinesiol.* 2013;23(6):1253-1260. doi:10.1016/j.jelekin.2013.07.009
- Speer KP, Lohnes J, Garrett WE. Radiographic imaging of muscle strain injury. *Am J Sports Med.* 1993;21(1):89-95; discussion 96. doi:10.1177/036354659302100116
- Sprague AL, Smith AH, Knox P, Pohlig RT, Grävare Silbernagel K. Modifiable risk factors for patellar tendinopathy in athletes: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2018;52(24):1575-1585. doi:10.1136/bjsports-2017-099000
- Stępień K, Śmigielski R, Mouton C, Cizek B, Engelhardt M, Seil R. Anatomy of proximal attachment, course, and innervation of hamstring muscles: a pictorial essay. *Knee Surg*

Sports Traumatol Arthrosc. 2019;27(3):673-684. doi:10.1007/s00167-018-5265-z

- Sugiura Y, Saito T, Sakuraba K, Sakuma K, Suzuki E. Strength deficits identified with concentric action of the hip extensors and eccentric action of the hamstrings predispose to hamstring injury in elite sprinters. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2008;38(8):457-464. doi:10.2519/jospt.2008.2575
- Sugiura Y, Sakuma K, Sakuraba K, Sato Y. Prevention of Hamstring Injuries in Collegiate Sprinters. *Orthop J Sports Med.* 2017;5(1):2325967116681524. doi:10.1177/2325967116681524
- Tate CM, Williams GN, Barrance PJ, Buchanan TS. Lower extremity muscle morphology in young athletes: an MRI-based analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(1):122-128. doi:10.1249/01.mss.0000179400.67734.01
- Thorborg K, Krommes KK, Esteve E, Clausen MB, Bartels EM, Rathleff MS. Effect of specific exercise-based football injury prevention programmes on the overall injury rate in football: a systematic review and meta-analysis of the FIFA 11 and 11+ programmes. *Br J Sports Med.* 2017;51(7):562-571. doi:10.1136/bjsports-2016-097066
- Timmins RG, Bourne MN, Shield AJ, Williams MD, Lorenzen C, Opar DA. 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.* 2016;50(24):1524-1535. doi:10.1136/bjsports-2015-095362
- Torğutalp ŞŞ, Özkan Ö, Parlak Ş, Oğuz KK, Korkusuz F. Volume and T2 relaxation time measurements of quadriceps femoris and hamstring muscles are reliable and reproducible. *Turk J Med Sci.* 2021;51(4):2007-2014. doi:10.3906/sag-2101-49
- Tracy BL, Ivey FM, Jeffrey Metter E, Fleg JL, Siegel EL, Hurley BF. A more efficient magnetic resonance imaging-based strategy for measuring quadriceps muscle volume. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(3):425-433. doi:10.1249/01.MSS.0000053722.53302.D6
- Trappe TA, Lindquist DM, Carrithers JA. Muscle-specific atrophy of the quadriceps femoris with aging. *J Appl Physiol (1985).* 2001;90(6):2070-2074. doi:10.1152/jappl.2001.90.6.2070
- van Beijsterveldt AMC, van de Port IGL, Vereijken AJ, Backx FJG. Risk factors for hamstring injuries in male soccer players: a systematic review of prospective studies. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(3):253-262. doi:10.1111/j.1600-0838.2012.01487.x
- 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.* 2016;46(6):899-912. doi:10.1007/s40279-015-0468-7
- van der Made AD, Almusa E, Reurink G, et al. Intramuscular tendon injury is not associated with an increased hamstring reinjury rate within 12 months after return to play. *Br J Sports Med.* 2018;52(19):1261-1266. doi:10.1136/bjsports-2017-098725

380. van der Made AD, Almusa E, Whiteley R, et al. Intramuscular tendon involvement on MRI has limited value for predicting time to return to play following acute hamstring injury. *Br J Sports Med.* 2018;52(2):83-88. doi:10.1136/bjsports-2017-097659
- van Dyk N, Behan FP, Whiteley R. Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: a systematic review and meta-analysis of 8459 athletes. *Br J Sports Med.* 2019;53(21):1362-1370. doi:10.1136/bjsports-2018-100045
- van Heumen M, Tol JL, de Vos RJ, et al. The prognostic value of MRI in determining reinjury risk following acute hamstring injury: a systematic review. *Br J Sports Med.* 2017;51(18):1355-1363. doi:10.1136/bjsports-2016-096790
- Verrall GM, Kalairajah Y, Slavotinek JP, Spriggins AJ. Assessment of player performance following return to sport after hamstring muscle strain injury. *J Sci Med Sport.* 2006;9(1-2):87-90. doi:10.1016/j.jsams.2006.03.007
- Verrall GM, Slavotinek JP, Barnes PG, Fon GT, Spriggins AJ. Clinical risk factors for hamstring muscle strain injury: a prospective study with correlation of injury by magnetic resonance imaging. *Br J Sports Med.* 2001;35(6):435-439; discussion 440. doi:10.1136/bjism.35.6.435
- Verrall GM, Slavotinek JP, Barnes PG, Fon GT. Diagnostic and prognostic value of clinical findings in 83 athletes with posterior thigh injury: comparison of clinical findings with magnetic resonance imaging documentation of hamstring muscle strain. *Am J Sports Med.* 2003;31(6):969-973. doi:10.1177/03635465030310063701
- Verrall GM, Slavotinek JP, Barnes PG, Fon GT, Esterman A. Assessment of physical examination and magnetic resonance imaging findings of hamstring injury as predictors for recurrent injury. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2006;36(4):215-224. doi:10.2519/jospt.2006.36.4.215
- Vivodtzev I, Monchamont L, Tamisier R, et al. Quadriceps muscle fat infiltration is associated with cardiometabolic risk in COPD. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2018;38(5):788-797. doi:10.1111/cpf.12481
- Walsh M, Boling MC, McGrath M, Blackburn JT, Padua DA. Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *J Athl Train.* 2012;47(4):406-413. doi:10.4085/1062-6050-47.4.17
- Wang H, Suh JW, Das SR, Pluta JB, Craige C, Yushkevich PA. Multi-Atlas Segmentation with Joint Label Fusion. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 2013;35(3):611-623. doi:10.1109/TPAMI.2012.143
- Wang H, Yushkevich PA. Multi-atlas segmentation with joint label fusion and corrective learning-an open source implementation. *Front Neuroinform.* 2013;7:27. doi:10.3389/fninf.2013.00027
- Wangenstein A, Almusa E, Boukarroum S, et al. MRI does not add value over and above

- patient history and clinical examination in predicting time to return to sport after acute hamstring injuries: a prospective cohort of 180 male athletes. *Br J Sports Med.* 2015;49(24):1579-1587. doi:10.1136/bjsports-2015-094892
- Wangenstein A, Bahr R, Van Linschoten R, et al. MRI appearance does not change in the first 7 days after acute hamstring injury—a prospective study. *Br J Sports Med.* 2017;51(14):1087-1092. doi:10.1136/bjsports-2016-096881
- Wangenstein A, Guermazi A, Tol JL, et al. New MRI muscle classification systems and associations with return to sport after acute hamstring injuries: a prospective study. *Eur Radiol.* 2018;28(8):3532-3541. doi:10.1007/s00330-017-5125-0
- Wangenstein A, Tol JL, Roemer FW, et al. Intra- and interrater reliability of three different MRI grading and classification systems after acute hamstring injuries. *Eur J Radiol.* 2017;89:182-190. doi:10.1016/j.ejrad.2017.02.010
- Weber KA, Smith AC, Wasielewski M, et al. Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury. *Sci Rep.* 2019;9(1):7973. doi:10.1038/s41598-019-44416-8
- Whyte EF, Heneghan B, Feely K, Moran KA, O'Connor S. The Effect of Hip Extension and Nordic Hamstring Exercise Protocols on Hamstring Strength: A Randomized Controlled Trial. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 2021;35(10):2682. doi:10.1519/JSC.0000000000003220
- Williams S, Trewartha G, Kemp S, Stokes K. A meta-analysis of injuries in senior men's professional Rugby Union. *Sports Med.* 2013;43(10):1043-1055. doi:10.1007/s40279-013-0078-1
- Williamson A, Hoggart B. Pain: a review of three commonly used pain rating scales. *J Clin Nurs.* 2005;14(7):798-804. doi:10.1111/j.1365-2702.2005.01121.x
- Woods C, Hawkins RD, Maltby S, et al. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football—analysis of hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2004;38(1):36-41. doi:10.1136/bjsm.2002.002352
- Wu YF, Zhang XY, Ren S, Yu YX, Chang CQ. [Measurement and evaluation of the quadriceps muscle mass in young men based on magnetic resonance imaging]. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban.* 2021;53(5):843-849.
- Yamauchi K, Kato C, Kato T. Characteristics of individual thigh muscles including cross-sectional area and adipose tissue content measured by magnetic resonance imaging in knee osteoarthritis: a cross-sectional study. *Rheumatol Int.* 2019;39(4):679-687. doi:10.1007/s00296-019-04247-2
- Yang Z, Choi I, Choi J, Jung J, Ryu M, Yong HS. Deep learning-based pectoralis muscle volume segmentation method from chest computed tomography image using sagittal range detection and axial slice-based segmentation. *PLoS One.* 2023;18(9):e0290950. doi:10.1371/journal.pone.0290950

Yeung SS, Suen AMY, Yeung EW. A prospective cohort study of hamstring injuries in competitive sprinters: preseason muscle imbalance as a possible risk factor. *Br J Sports Med.* 2009;43(8):589-594. doi:10.1136/bjism.2008.056283

Zunair H, Ben Hamza A. Sharp U-Net: Depthwise convolutional network for biomedical image segmentation. *Comput Biol Med.* 2021;136:104699. doi:10.1016/j.combiomed.2021.104699

Annexes

Annexe 1 Classification Peetrans

La classification de Peetrans a été initialement décrite à l'échographie (« Ultrasound of muscles » Peetrans, Eur Radiol, 2002), mais étendue largement à l'IRM. Elle est simple d'utilisation et fréquemment utilisée dans la littérature.

Elle ne comporte que 4 grades de lésions :

- Grade 0 : absence de lésion à l'imagerie
- Grade 1 : présence d'œdème sans lésion architecturale des fibres
- Grade 2 : lésion architecturale partielle des fibres
- Grade 3 : rupture musculaire ou tendineuse

Annexe 2 Classification BAMIC

Ces dernières années, une autre classification a été décrite : la British Athletic Muscle Injury Classification, BAMIC) ("British athletics muscle injury classification: a new grading system", Pollock et al., British Journal of Sports Medicine, 2014) et semble petit à petit s'imposer comme la plus utilisée. Elle est plus descriptive que la classification de Peetrans modifiée, car elle détaille la localisation tissulaire avec un suffixe (a, b ou c) pour définir le niveau lésionnel. Ainsi, le suffixe « a » fait référence à une lésion « myofasciale », le suffixe « b » à une lésion « musculotendineuse » et le suffixe « c » correspond à une « lésion intratendineuse ». Les lésions « a » touchent préférentiellement la périphérie du muscle alors que les lésions « c » ont une localisation centrale. Cette classification se compose de 5 grades (du grade 0 au grade 4) et le site lésionnel (a, b ou c) est précisé pour les grades 1 à 3.

Le grade 0 correspond à une lésion neuromusculaire (0a) ou une douleur musculaire généralisée (0b) avec IRM normale. Le grade 1 correspond à une atteinte de moins de 10% de surface et de moins de 5cm d'étendue. Le grade 2 correspond à une atteinte comprise entre 10% et 50% de surface et/ou entre de 5 et 15 cm d'étendue. Le grade 3 correspond à une atteinte supérieure à 50% de surface et/ou de plus de 15 cm d'étendue. Le grade 4 correspond à une rupture complète. Pour ce grade, seule la lettre c (rupture tendineuse) peut être ajoutée ; le grade « 4 » sans lettre ajoutée correspond à une rupture musculaire complète.

Grade 0

- Grade 0a => Focal neuromuscular lesion with normal MRI
- Grade 0b => Generalized muscle pain with normal MRI or MRI of delayed-onset muscle pain

Grade 1

- Grade 1a Injuries extend from the fascia and demonstrate high signal change on fat suppressed/STIR images within the periphery of the muscle, no greater than 10% into the muscle and with a longitudinal length of less than 5 cm within the muscle. Frank muscle fibre disruption is not usually seen in this grade of injury but evidence of fibre disruption of less than 1 cm with limited high signal change, as noted above, may still be classified in this grade. Intermuscular fluid/haematoma on MRI may be evident within the fascial planes over a greater distance
- Grade 1b Injuries are sited within the muscle or, more commonly, at the MTJ. High signal change is evident at this site and extends over a limited area of less than 5 cm and less than 10% of the muscle cross-sectional area at its maximal site. Frank muscle fibre disruption is not usually seen in this grade of injury but evidence of fibre disruption of less than 1 cm with limited high signal change, as noted above, may still be classified in this grade.

Grade 2

- Grade 2a Injuries usually extend from the peripheral fascia into the muscle. Clinical experience suggests that they may be associated with a clinical history of pain during change of direction and manual strength testing may be less reduced with grade 2a injuries relative to other grade 2 injuries. On MRI, high signal change will be evident from the periphery of the muscle. The high signal change will either measure between 10% and 50% of the cross-sectional area of that individual muscle at the site of injury or extend between 5 and 15 cm within the muscle. Architectural fibre disruption will be less than 5 cm.¹⁶
- Grade 2b Injuries occur within the muscle or, more commonly, at the MTJ. On MRI, the high signal change will either measure between 10% and 50% of the muscle cross-sectional area^{35 36} or have a longitudinal length between 5 and 15 cm. There is likely to be evidence of muscle fibre disruption of less than 5 cm.¹⁶
- Grade 2c injuries extend into the tendon but injury within the tendon is evident over a longitudinal length of less than 5 cm and less than 50% of the maximal tendon diameter on axial images. If the injury is near the end of the free tendon there may be some loss of tension in the free tendon. It may still be classified as a

2c, rather than 3c, if the injury size is compatible with the measurements above (figures 3–5).

Grade 3

- Grades 3a (myofascial) and 3b (muscular/musculotendinous) will demonstrate MRI features of high signal change patterns of greater than 50% of the muscle cross-sectional area or greater than 15 cm in length. There will be evidence of architectural fibre disruption which is likely to be greater than 5 cm.
- Grade 3b : 3a and 3b are differentiated by the location extending to the periphery (3a) or being within the muscle/at the MTJ (3b).
- Grade 3c (intratendinous) injuries have evidence of injury in the tendon over a longitudinal length of greater than 5 cm or greater than 50% of the tendon's maximal cross-sectional area. There is no evidence of a complete defect but there may be loss of the usual straight margins and tendon tension suggesting some loss of the tendon integrity

Grade 4

Grade 4 injuries are complete tears to either the muscle (grade 4) or tendon (grade 4c).

The athlete will experience sudden onset pain and significant and immediate limitation to activity. A palpable gap will often be felt. There may be less pain on contraction than with a grade 3 injury

Annexe 3 Questionnaire HAMMER clinique

Etude HAMMER (HAMstring MEchanics and MRI)
Localisation IRM/échographique des lésions musculaires des ischio-jambiers dans la pratique sportive
et liens avec le mécanisme lésionnel.
Questionnaire pour le patient

Cette étude a pour objectif d'établir une cartographie IRM/échographique des différents sites de lésions musculaires des ischio-jambiers ainsi que leur potentiel association avec le mécanisme lésionnel, afin de mieux comprendre et analyser la genèse de ces blessures.

1) Vos caractéristiques :

- âge : ___ ans
- sexe : masculin féminin
- profession : _____
- poids : _____ kg
- taille : _____ cm
- jambe servant pour le geste du tir au football (si applicable) : droite gauche
- jambe servant pour l'impulsion de sauts : droite gauche
- Antécédents personnel de chirurgie du ligament croisé antérieur (LCA) :
 - non
 - si oui : côté de la chirurgie : droite gauche
- Antécédents personnel de blessures musculaires des ischio-jambiers :
 - non
 - si oui : préciser la date : __/__/____ et le côté = droite gauche

2) Votre pratique sportive actuelle (au moment de la blessure) :

- nom du sport : _____
- nombre d'année de pratique : ___ ans
- niveau de pratique (s'il y en a un) : _____
- le volume de pratique :
 - => nombre d'heure par semaine = _____ heures
 - => nombre de séances/semaine = _____ séances

3) A propos de votre blessure des ischio-jambiers (pour laquelle vous passez votre IRM) :

- date de la blessure : __/__/____
- douleur ressentie au moment de la blessure :

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- douleur ressentie dans les 24 premières heures :

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- niveau de fatigue lors de la survenue de la blessure :

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

- circonstance de survenue :

- reprise d'entraînement après un temps d'arrêt significatif/repos/vacances
- entraînement standard
- lors d'une compétition/ un match
- en dehors du sport (activités de la vie quotidienne par exemple)

Détaillez si possible :

- changement d'équipement récent (crampousses, semelles, vélo, chaussettes de sport etc...)

- oui non

- événements indésirables récents (d'ordre professionnel ou personnel)

- oui non

4) A propos du mouvement lésionnel (plusieurs réponses possibles : choisissez celle(s) qui correspond(ent) le plus à votre blessure)

a) si pendant un sprint/une course à pied

Distance de course jusqu'au moment de la blessure, en mètre (marquez la bonne valeur) :



la blessure survient au démarrage



la blessure survient en milieu de course



la blessure survient en fin de course/ au freinage



b) si pendant un saut

à l'impulsion



à la réception



c) si pendant un mouvement de flexion du genou

en allant le pied (ou équivalent)

en tirant (ou équivalent)



d) sens/ direction du déplacement

vertical = course/sprint vers l'avant

latéral = course/sprint en latéral (pas chassé par exemple)

e) description libre du mécanisme lésionnel par le patient :

Annexe 4 Paramètres séquences HAMMER

	T1 axial	T2 axial	T2 coronal	T1 Dixon
Slice thickness (mm)	5	5	5	1.1
Voxel size (mm)	0.8*0.8*5	0.8*0.8*5	0.8*0.8*5	1.1*1.1*1.1
Relaxation time (ms)	700	8500	6820	4.08
Echo Time (ms)	12	83	79	1.35/2.58
Field of View (mm)	380	380	380	421
Fat suppression	None	SPAIR	SPAIR	Dixon
Water suppression	None	None	None	Dixon
Dimensions	2	2	2	3
Temps d'acquisition	1min17s	2min36s	2min32s	2min43s

Publications en rapport avec le travail de thèse

- « **Location of Hamstring Injuries Based on Magnetic Resonance Imaging: A Systematic Review** »

Sylvain Grange, Gustaaf Reurink , Anh Quoc Nguyen, Camille Riviera-Navarro, Clément Foschia, Pierre Croisille, Pascal Edouard

Sports Health. 2022 Feb 11;19417381211071010. doi: 10.1177/19417381211071010.

Article publié

- « **Association between baseline clinical and MRI characteristics of hamstring muscle injury and risk of hamstring muscle injury recurrence** » « Association entre les caractéristiques initiales cliniques et IRM d'une lésion musculaire des ischio-jambiers et le risque de récurrence de lésion musculaire des ischio-jambiers » *Journal de Traumatologie du Sport*

Sylvain Grange, Sébastien Charpentier, Pierre Croisille, Pascal Edouard.

Article publié

- « **Relationship between patients' self-reported injury mechanism and MRI outcomes in hamstring muscle injury: a prospective cohort study on 71 patients.** »

Sylvain Grange, Gustaaf Reurink, Pierre Croisille, Pascal Edouard

Article soumis

- « **Relationship between the pain intensity at the time of the hamstring muscle injury and the hyperintense T2-weight volume of the hamstring muscle lesion measured by MRI.** »

Sylvain Grange, Ronan Plancher, Gustaav Reurink, Pierre Croisille, Pascal Edouard

Article soumis

- **" Quantification of quadriceps and hamstring muscle volume: toward an optimal strategy using sparse segmentation?"**

Sylvain Grange, Thu Nguyen, Thomas Grenier, Magalie Viallon, Pascal Edouard, Pierre Croisille

Article en cours de préparation

- **« Quantitative Magnetic Resonance Imaging Assessment of the Quadriceps Changes during an Extreme Mountain Ultramarathon »**

Hoai-Thu NGUYEN, Thomas GRENIER, Benjamin LEPORQ, Caroline LE GOFF, Benjamin GILLES, **Sylvain GRANGE**, Rémi GRANGE, Grégoire MILLET, Olivier BEUF, Pierre CROISILLE, Magalie VIALLON. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 53 (2021) – DOI 10.1249/mss.0000000000002535. – ISSN 0195–9131

Article publié

- **« MRI localization of hamstring muscle injury occurred during sports practice and links with the lesion mechanism: Preliminary results of the HAMMER study (HAMSTRING MECHANICS AND MRI) »** « Localisation en IRM des lésions musculaires des ischiojambiers survenues lors de la pratique sportive et liens avec le mécanisme lésionnel : Résultats préliminaires de l'étude HAMMER (HAMSTRING MECHANICS AND MRI) » *Journal de Traumatologie du Sport*

Anh Quoc Nguyen, **Sylvain Grange**, Luc Court, Fabrice-Guy Barral, Pascal Edouard

Article publié

Communications en rapport avec le travail de thèse

1) Conférences nationales

- **« Kit de lecture de l'IRM des ischio-jambiers », Journées Françaises de radiologie, 2018**

Anh Quoc Nguyen, **Sylvain Grange**, Pascal Edouard, Mounir Chamakh, Bérengère Delorme, Alban Chazot, Emile Youssouf, Fabrice-Guy Barral, Claire Boutet

Poster accepté

- **« A propos d'une série de 14 cas cliniques IRM sur les lésions traumatiques des ischio-jambiers survenue dans la pratique sportive. », Journées Françaises de radiologie, 2018**

Anh Quoc Nguyen, **Sylvain Grange**, Pascal Edouard, Mounir Chamakh, Bérengère Delorme, Alban Chazot, Emile Youssouf, Fabrice-Guy Barral, Claire Boutet

Poster accepté

- **Journées Françaises de Radiologie 2021 : participation au congrès et orateur de 3 conférences (hors sujet de thèse)**

- **Journées Françaises de Radiologie 2023 : participation au congrès et orateur de 3 conférences (hors sujet de thèse)**

2) Conférences internationales

- **« International Congress of Radiology » – Hurghada, Egypt, March 15-18, 2023**
Présentation orale pour la Société Française de Radiologie

- **« Radiological Congress of North America » - Chicago, USA, November 25-30, 2018**

Participation au congrès

- **« Robust multi-atlas MRI segmentation with corrective learning for quantification of local quadriceps muscles inflammation changes during a longitudinal study in athletes »**

Hoai-Thu Nguyen, Pierre Croisille, Magalie Viallon, Charles De Bourguignon, Rémi Grange, **Sylvain Grange**, Thomas Grenier.

ISMRM: International Society for Magnetic Resonance in Medicine. Paris, 2018

Poster accepté

- **« Robustly segmenting quadriceps muscles of ultra-endurance athletes with weakly supervised U-Net »**

Hoai-Thu Nguyen, Pierre Croisille, Magalie Viallon, ; Sarah Leclerc, **Sylvain Grange**, Rémi Grange, Olivier Bernard, Thomas Grenier.

International Conference on Medical Imaging with Deep Learning. London, 2019

Poster accepté

- **« Impact of Distortion on Local Radiomic Analysis of Quadriceps Based on Quantitative Magnetic Resonance Imaging Data »**

Hoai-Thu Nguyen, **Sylvain Grange**, Benjamin Leporq, Magalie Viallon Pierre Croisille, Thomas Grenier.

International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences, 2021

Poster accepté

Résumé

Les connaissances en imagerie sur les blessures musculaires ont évolué ces dernières années. Leur prise en charge diagnostique et thérapeutique reste encore très hétérogène. Notre revue de la littérature sur les données des blessures des ischio-jambiers en IRM a permis de faire le point sur les connaissances actuelles et de montrer que la description de ces blessures est encore très sparse et mal codifiée à l'IRM. De plus, les blessures des ischio-jambiers, autrefois considérées comme une seule et même entité, tendent aujourd'hui à être distinguées séparément. Le polymorphisme de ces blessures se retrouve dès le mécanisme lésionnel, notamment sur les deux principaux types, à savoir lors d'un sprint ou lors d'un étirement du muscle. A l'IRM, les lésions sont différenciées à la fois sur le muscle touché, mais aussi sur la structure tissulaire, le volume lésionnel, la localisation proximo-distale. La mise en place de notre cohorte HAMMER (HAMstring MEchanism mRi) de suivi prospectif des blessures des ischio-jambiers nous a permis de mettre en évidence un lien entre le mécanisme lésionnel et les composantes IRM, à savoir que les lésions par mécanisme d'étirement présentent une sévérité plus importante, à la fois en termes de grade et de volume lésionnel. De plus, nous avons établi une relation entre un paramètre clinique d'évaluation simple (la douleur au moment de la blessure) et le volume lésionnel. Nous avons aussi montré que le plus faible volume lésionnel, l'âge plus bas, le sexe masculin, un plus petit indice de masse corporelle et la plus faible douleur initiale sont des facteurs de risque de récurrence. Nous avons par la suite, à partir des données de la cohorte HAMMER, établi un programme de délimitation non supervisé des muscles de la cuisse. Nous avons ainsi pu analyser la fiabilité des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour déterminer le volume musculaire, et la comparer avec ces méthodes non supervisées. L'estimation du volume musculaire mais aussi du volume lésionnel pourrait à terme être réalisée en pratique courante, et ainsi avoir une approche quantitative rapide lors d'une IRM réalisée lors d'une blessure des ischio-jambiers. L'analyse prédictive du temps de retour au sport et l'estimation du risque de récurrence nécessitent une approche multifactorielle.

Mots clés : Imagerie par Résonance Magnétique - Muscles ischio-jambiers - Blessures - Mécanisme lésionnel - Volume - Segmentations non supervisées