

Diplôme d'État de Masseur-Kinésithérapeute

MÉMOIRE

UNITE D'ENSEIGNEMENT 28

**L'adaptation des paramètres biomécaniques de
la course à pied dans la prise en charge des
coureurs atteints de tendinopathie d'Achille**

UNE REVUE DE LITTÉRATURE

Année 2025-2026

NONNON Corentin

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon expert mémoire pour son accompagnement et sa disponibilité tout au long de la rédaction de ce travail. Son intérêt pour le sujet a été d'une aide précieuse.

Je souhaite également présenter des remerciements sincères à mon référent pédagogique, à la fois pour son aide dans la réalisation de ce travail mais également pour sa présence et son écoute durant ces années à l'IFMK.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de l'équipe pédagogique ainsi qu'à l'ensemble de mes maîtres de stages qui auront tous permis, à leur manière, de façonner le professionnel de santé que j'aspire à devenir : un masseur-kinésithérapeute bienveillant, impliqué et curieux.

Bien sûr, ces mots ne peuvent s'écrire sans remercier chaleureusement mes parents. Ils m'ont toujours soutenu, accompagné et surtout poussé à me dépasser. Le parcours que j'ai réalisé est un reflet de leur investissement.

Je tiens à remercier ma sœur, Pauline, qui a toujours été une source d'inspiration par sa discipline et sa réussite.

Merci à Marie, qui m'accompagne au quotidien, pour son oreille attentive et ses précieux conseils.

Merci à mon colocataire et meilleur ami, Isaac, d'avoir partagé tous les moments de ces études, à la fois les moments de joie et les moments de doute.

Merci aux ReimReim et aux Chipies, qui ont rendu ces quatre années à l'institut magiques. C'est à vos côtés que mes souvenirs les plus mémorables se sont construits et perdureront.

Liste des abréviations

AP : Activité Physique

AT RRI: Achilles Tendon Running-Related Injuries

BJSM: British Journal of Sports Medicine

BPM : Battement Par Minute

EN : Échelle numérique

ES : Effect Size

EVA : Échelle Visuelle Analogique

FDR : Facteur De Risque

FFS : ForeFoot Strike

GCT : Ground Contact Time

INJEP : Institut National de la Jeunesse et de l'Éducation Populaire

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

MFS : MidFoot Strike

Ppm: Pas Par Minute

PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

RLH: Royal London Hospital

RFS: RearFoot Strike

SMD: Standardized Mean Difference

TA: Tendinopathie d'Achille

TAI : Tendinopathie d'Achille d'Insertion

TAC : Tendinopathie d'Achille Corporéal

TCS : Temps de Contact au Sol

VISA-A: Victorian Institute of Sports Assessment – Achilles)

Sommaire

Introduction	5
1. Le tendon d'Achille.....	6
1.1 Rappel anatomique	6
1.2 Histologie	7
1.2.1 L'insertion calcanéenne	7
1.2.2 La structure tendineuse	7
1.3 Propriété	8
2. La tendinopathie	9
2.1 Présentation du Continuum de Cook	9
3. La tendinopathie d'Achille	11
3.1 Incidence.....	11
3.2 Facteurs de risque	11
3.3 Tendinopathie d'Achille corporéal (TAC).....	12
3.3.1 Diagnostic	12
3.3.2 Traitement conservateur.....	12
3.3.3 Traitement chirurgical.....	13
3.4 Tendinopathie d'Achille d'insertion/Enthésopathie (TAI).....	13
3.4.1 Diagnostic	14
3.4.2 Traitement conservateur.....	14
3.4.3 Traitement chirurgical.....	15
3.5 Évaluation de la fonction : VISA-A	15
3.6 Diagnostic différentiel de Tendinopathie d'Achille	16
4. La course à pied	16
4.1 Présentation générale	16
4.2 Cycle de course : les phases de la course à pied	17
4.2.1 La phase d'appui, « Stance phase ».....	17
4.2.2 La phase de suspension, « Swing Phase »	17
4.3 Facteurs biomécaniques de la course à pied.....	17
4.3.1 Définition.....	17

4.3.2	Paramètres spatio-temporels	18
4.3.3	Cinématique articulaire	18
4.3.4	Le pattern d'attaque du pied	19
4.3.5	Paramètres cinétiques	19
4.4	Effets de la course à pied sur la santé	19
4.4.1	Bénéfices de la course à pied sur la santé	19
4.4.2	Blessures liées à la course à pied.	20
Méthodologie		21
1.	Élaboration de la question de recherche et genèse du questionnement	21
2.	Outils de formulation	23
3.	Mots clés et MeSH Terms	24
4.	Les moteurs de recherche	25
5.	Stratégie de recherche	26
6.	Diagramme de flux	28
6.1	Critères d'éligibilité	28
6.2	Sélection des études	28
7.	Échelle de qualité méthodologique	29
Résultats		30
1.	Présentation des études	30
1.1	Description des études	30
1.2	Qualité méthodologique des études incluses	30
2.	Description des populations	31
3.	Définition et critères diagnostiques de la tendinopathie d'Achille	33
4.	Protocole d'analyse biomécanique et critères d'évaluation	33
5.	Critères de jugement primaire	35
5.1	Paramètres biomécaniques associés à la tendinopathie d'Achille	36
5.2	Influence des paramètres biomécaniques modifiables sur la charge du tendon d'Achille ..	39
Discussion		43
1.	Synthèse des principaux résultats	43
2.	Lien entre paramètres biomécaniques et charge tendineuse	44

3. Implications cliniques en kinésithérapie	44
3.1 Paramètres biomécaniques difficilement modifiables	44
3.2 Paramètres biomécaniques modifiables.....	46
3.3 Implication clinique en kinésithérapie	52
4. Limites et biais de la revue	55
5. Points forts de la revue.....	57
6. Perspective de recherche et implication clinique	57
Conclusion et réponse à la problématique	59
Bibliographie.....	61
Table des illustrations	67
Table des annexes	68

Introduction

De nos jours, il est admis que l'activité physique (AP) est à l'origine de nombreux bénéfices pour la santé. (1,2) La pratique d'une AP régulière, lorsqu'elle est d'intensité modérée à intense est associée à une diminution des risques de mortalité. Par ailleurs, quel que soit ce niveau de pratique, les personnes les moins sédentaires sont également celles les moins exposées au risque d'apparition de pathologies chroniques (diabète, maladies cardiovasculaires, maladie de Parkinson...). Parmi ces activités physiques, la marche et la course à pied sont celles les plus populaires chez les Français de 15 ans et plus, un chiffre en hausse par rapport à 2018 d'après l'INJEP. (40%). (3)

En effet, par son accessibilité et sa facilité, la course à pied n'a cessé de gagner en adeptes dans les dernières années. Les profils de coureurs sont nombreux, qu'ils soient amateurs ou compétiteurs, beaucoup utilisent ce sport comme un moteur de bonne santé, à la fois physique et mentale. Toutefois, la course à pied est également génératrice de contraintes mécaniques qu'elle impose au corps, étant à l'origine d'une prévalence de blessures élevée dans cette population. Près d'un coureur sur deux sera touché par une pathologie en lien avec la pratique de la course à pied au cours d'une année. (4)

Parmi ces pathologies du coureur, les structures musculosquelettiques des membres inférieurs sont les plus touchées. Le plus souvent, leurs origines sont atraumatiques et résultent plutôt d'une surcharge mécanique. C'est dans ce contexte que la tendinopathie d'Achille (TA) constitue l'une des pathologies les plus fréquentes chez le coureur, expliquant le nombre de patients qui consultent dans ce cadre.

En s'appuyant sur les travaux de Cook et Purdam (5), la réflexion autour des éléments modulant les charges tendineuses des coureurs sur ce tendon d'Achille prend sens. C'est dans ce cadre que cette revue de littérature explorera les paramètres biomécaniques de la course pour analyser cette charge tendineuse, avant de faire un lien entre les résultats et la pratique clinique en masso-kinésithérapie.

1. Le tendon d'Achille

1.1 Rappel anatomique

Le tendon d'Achille, tendon calcanéen ou encore tendon achilléen est le tendon le plus épais et le plus puissant de l'appareil locomoteur humain. Il mesure en moyenne 15 centimètres. Localisé sur la partie postérieure du segment jambier, il résulte de la fusion de deux lames terminales issues des muscles qui le composent : (6)

- Le muscle gastrocnémien, qui est le muscle le plus superficiel de la loge postérieure de la jambe et qui constitue une partie majeure du galbe du mollet. Ce muscle est séparé en deux chefs ; un chef médial qui s'insère sur la partie postérieure et médiale de l'épiphyse distale du fémur, et un chef latéral qui trouve son insertion sur la partie postéro-latérale de cette même épiphyse. (7,8)
- Le muscle soléaire, situé en avant du muscle gastrocnémien. Ce muscle est un large corps musculaire plat s'insérant à sa partie supérieure sur le tibia ainsi que la fibula. Il s'unit au muscle gastrocnémien en formant le tendon d'Achille qui trouvera son insertion sur la partie postérieure du calcaneum. (3,4)
- On retrouve également le muscle plantaire grêle, muscle inconstant car absent dans 6% à 8% de la population. Il s'insère sur la partie latéro-inférieure de la ligne supra-condylaire du fémur ainsi que sur le ligament poplité. Son tendon mince trouve un passage entre le soléaire et le gastrocnémien avant de se joindre le tendon d'Achille sur sa partie antéro-médiale. (7)

L'ensemble de ces muscles est innervé par le nerf tibial et le nerf fibulaire commun. (7)

Pour finir, le tendon d'Achille est entouré d'une structure para-tendineuse (paratendon) également innervée et vascularisée qui peut être la source de diagnostics différentiels lors d'atteintes de cette structure.(8)

Les actions qu'auront ces muscles sont essentielles pour l'activité de locomotion de l'être humain. En effet, au niveau de l'articulation tibio-tarsienne, cet ensemble nommé triceps sural permet la flexion plantaire du pied par rapport à la jambe. De plus, via leurs insertions bi-articulaires, les muscles gastrocnémien et plantaire grêle ont une action sur la flexion du genou. (7)

1.2 Histologie

1.2.1 L'insertion calcanéenne

L'insertion du tendon d'Achille correspond à une zone d'enthèse présentant une architecture unique pour la répartition des contraintes. Un ensemble de jonctions ostéotendineuses, de cartilage sésamoïde et de fibrocartilage couvre la tubérosité postérieure du calcanéum. On retrouve également des bourses ; une bourse rétrocalcaneenne située entre la surface osseuse et tendineuse composée en partie de fibrocartilage, une bourse superficielle et une bourse sous-calcaneenne. Cette zone de contact permet un bras de levier important, avec une répartition des pressions assurée par les structures graisseuses. (6)

1.2.2 La structure tendineuse

Le tendon achilléen est composé en grande majorité de ténocytes et de ténoblastes. Les autres éléments, qu'ils soient vasculaires, musculaires ou autres ne représentent que 5 à 10% de la composition histologique du tendon. Un des éléments majeurs de ce tendon est le collagène, représentant 70% du poids sec du tendon. Dans un tendon sain, 90% de ce collagène est du collagène de type I. Son alliage avec une faible proportion de fibres d'élastine (1%) permet à la fois de subir les contraintes mais aussi de pouvoir les restituer. Si la proportion de fibres d'élastine augmentait, l'efficacité du tendon serait diminuée. (6,7) Le collagène est organisé de manière précise, dans des faisceaux parallèles innervés et vascularisés. L'ensemble forme des fascicules, se regroupant eux-mêmes dans un endotendon. L'ensemble de ces endotendons constitue le tendon macroscopique. Ce tendon comprend également deux couches superficielles, le paratendon et l'épitenon. Celles-ci sont séparées par une fine couche de liquide permettant la diminution des forces de frottement.

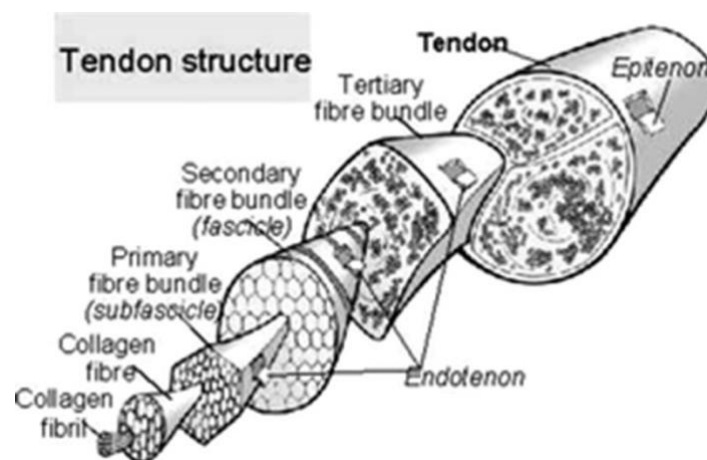


Figure 1 : Schéma de la composition histologique d'un tendon en coupe transversale (6)

Dans le cadre des tendinopathies d'Achille, c'est une désorganisation de ces structures collagéniques qui est observée, ainsi qu'une augmentation de la proportion de collagène de type III, plus fragile que le type I. (6,9)

1.3 Propriété

Par sa composition et ses insertions, le tendon d'Achille permet l'absorption et la transmission des forces des muscles vers les os et joue un rôle fondamental dans le cycle étirement-raccourcissement, à l'image d'un ressort essentiel à l'activité de bipédie. Il emmagasine l'énergie élastique lors de la phase d'appui et la restitue lors de la phase de propulsion, optimisant ainsi l'économie musculaire et articulaire lors de la course. (10) Pendant la marche, on estime qu'il absorbe 3 à 5 fois le poids du corps, et jusqu'à 12,5 fois le poids du corps durant la course à pied. (11) La force développée par le tendon d'Achille est donc surtout corrélée à la masse corporelle ; le sexe ou encore la taille n'ont pas d'influence sur cette donnée.

Dans un état de repos, le tendon d'Achille est détendu, ce qui lui donne un aspect en vague / ondulé. Lorsque les contraintes augmentent, le tendon s'étire. Il perd cet aspect ondulé à 2% d'étirement mais est capable de retrouver son état initial si l'étirement ne dépasse pas les 4% (comportement élastique). Au-delà, des désorganisations et des ruptures du collagène dans la matrice extracellulaire se créent (comportement plastique). Lorsque l'étirement dépasse les 8%, une rupture macroscopique se produit. (12)

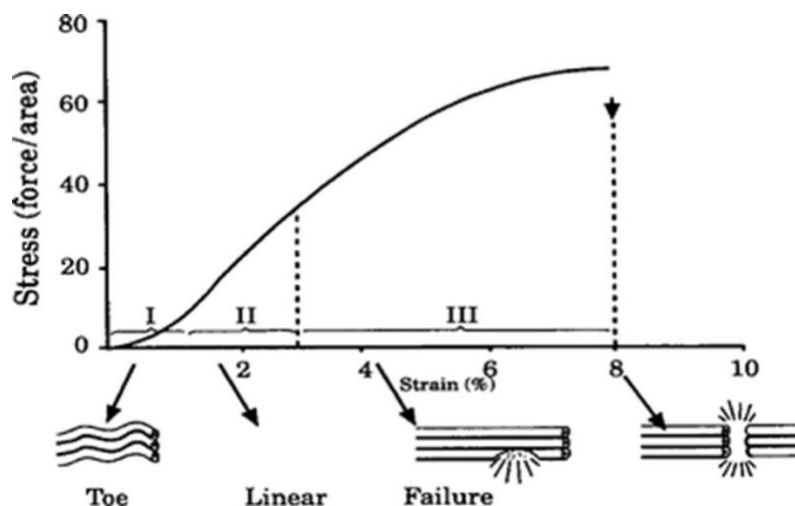


Figure 2 : Schéma de la relation contrainte-étirement dans le tendon d'Achille (6)

2. La tendinopathie

La tendinopathie est un terme qui a beaucoup évolué ces dernières années. Depuis les premiers travaux de Stanish et le développement des protocoles excentriques, la notion de tendinite, synonyme de processus inflammatoire a largement été discutée et a évolué vers un terme plus global laissant place à plusieurs étiologies : la « tendinopathie ».

2.1 Présentation du Continuum de Cook

Actuellement, le modèle présenté par J. Cook et Purdam en 2009 et révisé en 2016 est celui qui prime dans la description du mécanisme d'apparition et d'évolution de la tendinopathie, on parle du « Continuum des tendinopathies » (5). Du fait de surutilisations chroniques et/ou de l'apparition d'un stress aigu, une activation cellulaire physiologique se met en place. J. Cook et Purdam décrivent la tendinopathie en trois stades qui interagissent entre eux (5) :

- L'état réactif, ou tendinopathie réactionnelle, est la première phase de ce continuum. Il apparaît en réponse à une surcharge imposée à un tendon, comme une activité inhabituelle chez une personne sédentaire, un traumatisme direct comme un tacle d'un footballeur ou encore une surcharge d'entraînement. Dans ce cas, un épaissement global du tendon est observé. Cet épaissement est entraîné par une réponse cellulaire à l'origine d'une augmentation de la synthèse de protéoglycanes qui vont fixer des molécules d'eau. En revanche, les fibres de collagène restent intactes. L'état réactif est réversible et rapide. Son retour à un état physiologique entraîne une meilleure résistance aux futures contraintes, par un phénomène adaptatif. (5)
- Le second stade décrit par J. Cook et Purdam correspond à l'état de dysréparation, qui est la suite de l'état réactif si une contrainte excessive continue d'être appliquée au tendon déjà réactif. Dans ce cas, un remaniement tissulaire est observé, dû à une augmentation cellulaire entraînant une désorganisation de la matrice extracellulaire et des fibres de collagène. Comme au stade précédent, un épaissement existe également mais celui-ci est localisé. À ce stade, la réversibilité est toujours possible mais sera dépendante d'une gestion optimale des contraintes via la rééducation. Les principaux leviers d'action seront : la durée de mise en charge, la fréquence d'utilisation et l'intensité des contraintes. (5)

- L'état dégénératif est la suite du stade de dysréparation si celui-ci n'est pas géré. Dans ce cas, un remaniement tissulaire irréversible est présent, avec l'apparition de nodules et un épaissement généralisé. La zone tissulaire atteinte perd alors sa fonction principale d'absorption et de transmission d'énergie avec une diminution de la capacité en charge du tendon. (5)

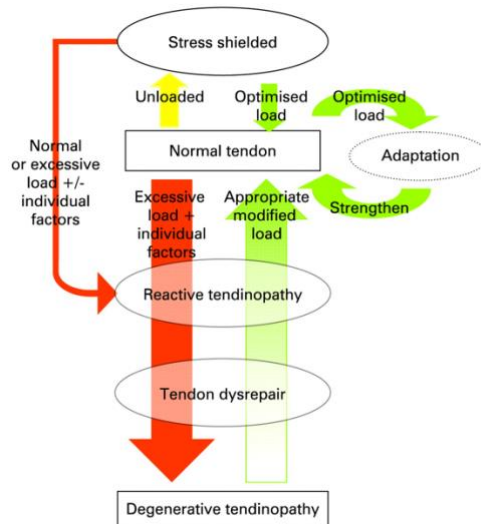


Figure 3: Pathology Continuum of Cook and Purdam, BJSM – 2009 (5)

En 2016, Cook et Purdam complètent leur propre continuum en faisant évoluer le stade dégénératif. En effet, ils notent qu'au sein d'un tendon supposé dégénératif (stade 3), il est possible d'observer également des portions réactionnelles (stade 1) (13). Ces portions correspondent aux tissus sains adjacents à la portion dégénérative qui, pour contrebalancer cette zone, s'hypertrophient. Et comme tous les tissus tendineux, si une contrainte excessive est appliquée, des signes de tendinopathie réactionnelle surviennent et suivent la logique du continuum de la tendinopathie. (13)

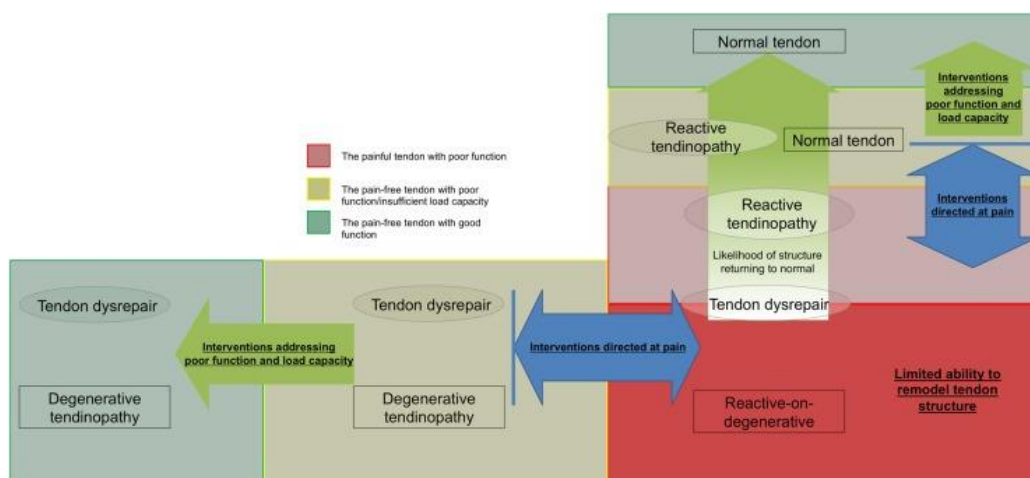


Figure 4 : Cook and Purdam continuum, BJSM – 2016 (13)

3. La tendinopathie d'Achille

La tendinopathie achilléenne (TA) est une pathologie fréquente à la fois dans la population générale et également chez le sportif, notamment dans les sports de saut et/ou de course. Cette tendinopathie est généralement marquée par une triade constituée de douleur, d'une gêne fonctionnelle et d'un épaissement tendineux (comme expliqué dans le continuum de Cook). La littérature distingue clairement deux entités cliniques : la TA corporeale et l'enthésopathie. (14)

3.1 Incidence

Dans la population générale, on estime que 6 % des individus seront atteints ou ont déjà été atteints de TA. (15) Si on s'intéresse plus précisément à la course à pied, les chiffres diffèrent selon les auteurs, les populations et les critères de sélection mais on estime que 4,2 % à 10,9 % des coureurs développeront une TA. (15,16) Parmi les pathologies communes du coureur récréatif, la TA correspond à l'une des plus courantes, avec 8 % à 15 % de cet ensemble. (4,17)

Au sujet de l'incidence spécifique aux deux types de TA, on retrouve une proportion de 28 % pour la tendinopathie d'Achille insertionnelle (TAI) contre 64 % pour la tendinopathie d'Achille corporeale (TAC). Les 8 % restants correspondent à des atteintes mixtes. (15)

3.2 Facteurs de risque

Il existe de nombreux facteurs de risque (FDR) liés à l'apparition d'une tendinopathie d'Achille, certains sont modifiables et d'autres non. Le principal facteur de risque identifié est un antécédent de tendinopathie d'Achille dans les 12 derniers mois, que ce soit pour la TAC comme pour la TAI. Un antécédent de fracture sur le membre inférieur concerné est également un FDR reconnu. (11)

Parmi ces facteurs modifiables, on retrouve la prise de certains médicaments, surtout les antibiotiques de la famille de quinolones, ainsi que la consommation régulière d'alcool. Des facteurs liés à l'entraînement et aux capacités physiques sont également impliqués tels que des conditions d'entraînement contraignantes, comme le froid. (18)

L'âge constitue également un facteur de risque, en effet, l'incidence des TA dans la population de moins de 18 ans est de 2% tandis que chez les sujets de 45 ans, elle monte à 8%. (19)

Dans la population spécifique des coureurs, il est également observé que les coureurs de moyennes et de longues distances (42km) sont plus sujets à développer une TA que les coureurs de distances plus courtes. (11)

3.3 Tendinopathie d'Achille corporéal (TAC)

La TAC, également décrite sous le terme de tendinopathie non-insertionnelle, est une atteinte de la portion moyenne du tendon (mid-portion). Cette zone commence à deux centimètres au-dessus de l'insertion calcanéenne et se termine à six centimètres au-dessus. (16) Le symptôme principal d'une TAC est la présence de douleur pouvant altérer les activités physiques. De plus, une raideur est ressentie après une période de repos, comme le dérouillage matinal par exemple. (16)

3.3.1 Diagnostic

Pour diagnostiquer la TAC, on divise les tests en deux catégories : d'un côté les tests de palpation et de l'autre les tests de mise en charge.

Les tests de palpation ont pour but principal de repérer une douleur, un épaissement ou encore des signes de crépitements. On note deux tests qui semblent cliniquement sensibles (16):

- Le signe de l'arc douloureux (« painful arc sign ») qui permet de faire le diagnostic différentiel d'une atteinte du paratendon. Ce test consiste à repérer l'épaississement ou la zone sensible du tendon par une palpation et à observer si cette zone se déplace lors des mouvements de la cheville. Si la zone en question est mobile alors une tendinopathie est plus probable. (20)
- Le Royal London Hospital (RLH) test, qui provoque une diminution de la douleur localisée sur l'épaississement à la palpation lors d'une flexion dorsale maximale active (position d'étirement). (16)

Les tests de mise en charge sont des tests plutôt fonctionnels servant de marqueur de la présence ou non de douleur. À titre d'exemple, on peut retrouver des tests de sauts, de montée sur pointe de pied unilatéral ou encore de la pliométrie.(16)

3.3.2 Traitement conservateur

Dans le cadre de la tendinopathie d'Achille corporéale, de nombreuses pistes de traitement ont été étudiées. Le premier résultat avéré est que les résultats à 12 semaines sont meilleurs dans les thérapies avec des approches actives plutôt qu'une prise en charge attentiste

basée sur le repos total. (21) L'ensemble du traitement conservateur est prodigué par le masseur-kinésithérapeute, par la réalisation d'exercices en séance et en dehors, ainsi que sur les conseils d'adaptations des activités selon la symptomatologie.

Parmi les thérapies actives, les plus efficaces sont celles comprenant des exercices spécifiques sur la zone du triceps sural dans les différents modes de contraction (excentrique, isométrique et concentrique). (21) De plus, les thérapies basées sur l'exercice montrent des résultats similaires à celles associant exercices et injections ou port d'attelle de nuit. (21)

Une autre base essentielle du traitement est l'adaptation de la charge appliquée au tendon (diminution des contraintes). Cette décharge doit se faire de manière dégressive et par paliers pour ne pas déconditionner la structure. Réciproquement, la remise en charge doit se faire de manière progressive, en modulant l'intensité, la durée et la fréquence des sollicitations afin de revenir à un état normal. Ce principe suit la logique du continuum de Cook et Purdam (5) présenté précédemment.

Pour illustrer cette notion d'oscillation des contraintes et des réactions physiologiques ou pathologiques associées, le terme de « Quantification du Stress Mécanique » a été mis en place par Blaise Dubois dans son ouvrage. (22)

3.3.3 Traitement chirurgical

Le traitement chirurgical dans le cadre d'une TAC n'est clairement pas celui de première intention. Toutefois, lorsque la tendinopathie persiste (douleur quotidienne, gêne fonctionnelle majeure) malgré la mise en place d'un traitement conservateur supposé être efficace, il est possible d'envisager la chirurgie. Il est également possible de l'envisager lorsque des remaniements anatomiques majeurs sont observés (nodules, altérations structurelles importantes...) Cette option est envisagée après au moins six mois de traitement conservateur.

Les techniques peuvent être mini-invasives ou ouvertes et présentent un taux de résultats et de satisfaction similaires. (23) Elles consistent principalement en un débridement du tendon, visant à retirer une partie des tissus endommagés ou calcifiés. La technique mini-invasive est privilégiée en raison d'un risque de complications diminué.(23)

3.4 Tendinopathie d'Achille d'insertion/Enthésopathie (TAI)

L'enthésopathie d'Achille correspond à des douleurs localisées sur l'insertion calcanéenne, entre 0 et 2 centimètres de celle-ci. Son origine est liée à des contraintes

mécaniques répétées, associant des forces des tractions et de compression sur le calcanéum. Ces contraintes s'exercent de manière axiale, sur la portion superficielle du tendon mais également de manière transversale en compression sur l'insertion. (24) (25)

L'étiologie de la douleur n'est pas la même selon les populations. Chez le sportif, elle est liée à une surcharge répétée, susceptible d'altérer la vascularisation locale. C'est pourtant cette vascularisation qui permet la cicatrisation des tissus face aux contraintes. Cette altération entraîne une désorganisation de la zone d'insertion et favorise l'apparition de modifications structurelles. (25)

Certaines particularités anatomiques, telles qu'une excroissance osseuse postérieure du calcanéum (déformation d'Haglund), peuvent majorer les phénomènes compressifs, contribuant au développement de la symptomatologie. (26)

3.4.1 Diagnostic

Pour diagnostiquer une enthésopathie d'Achille, l'examen nécessaire est essentiellement clinique. Un des marqueurs de cet examen est la présence d'un épaissement supérieur à 6 mm sur l'insertion calcanéenne. (26) *Nicholson et al.* ont proposé un système de classification par grade (I, II et III) via un examen échographique. (26)

L'examen palpatoire montre également une douleur à l'appui sur les 2 centimètres distaux du tendon. On peut observer un gonflement et une rougeur de cette zone. (26)

Comme pour la TAC, on observe une diminution de l'amplitude de flexion dorsale et une faiblesse des muscles de la flexion plantaire. La douleur est aggravée par l'activité et une raideur est retrouvée à la suite d'une période de repos prolongée. (26)

On peut également avoir recours à des examens d'imagerie, notamment l'IRM, dans le but d'évaluer la présence ou non d'excroissances, de remaniements structurels ou de bursite. Cependant, la clinique prime sur l'imagerie. En effet, jusque 35 % de la population avec des signes de TAI à l'imagerie sont asymptomatiques, et inversement, jusque 19 % de patients avec des TAI n'ont pas de signes à l'imagerie mais une symptomatologie clinique correspondante.

3.4.2 Traitement conservateur

Le traitement conservateur, défini comme l'ensemble des prises en charge non chirurgicale visant à diminuer la douleur et améliorer la fonction, correspond à un ensemble de recommandations. Cette prise en charge relève du domaine de compétence du masseur-

kinésithérapeute, qui intervient pour améliorer la fonction des patients atteints de TAI, par la réalisation et l'application des techniques suivantes :

On retrouve deux recommandations de Grade B (supportées par des preuves solides) :

- Le travail en contraction excentrique sur le tendon d'Achille, avec des résultats plus favorables lorsque l'amplitude n'est pas complète, notamment en dorsiflexion. (26)
- L'utilisation d'ondes de choc, qui, malgré une douleur élevée durant le traitement permettrait une diminution de la douleur à long terme. En revanche, l'absence de protocole défini constitue un frein à l'utilisation de cette thérapie. (26)

D'autres modalités ont été étudiées, telles que les injections (plasma riche en plaquette, intra ou péri-tendineuse), le port d'attelle nocturne, mais ne disposent pas de preuve suffisante.

3.4.3 Traitement chirurgical

Le traitement chirurgical est considéré comme une option lorsque la TAI est chronique ou récurrente. Plusieurs interventions sont décrites mais une seule est de niveau de preuve grade B. Elle consiste en une ouverture avec débridement et décompression de l'enthèse, permettant une vision d'ensemble des structures. Il est important de prendre en compte les risques généraux liés aux techniques chirurgicales et à l'anesthésie.

3.5 Évaluation de la fonction : VISA-A

Pour établir un score de sévérité concernant l'atteinte fonctionnelle d'une tendinopathie d'Achille, ou plus largement d'une douleur achilléenne, l'échelle VISA-A (Victorian Institute of Sports Assessment – Achilles) se montre la plus adaptée. De plus, elle permet un suivi quantitatif de la fonction lors de la mise en place d'un traitement conservateur et constitue un outil utile pour adapter les modalités de prise en charge. (27)

La passation de l'échelle VISA-A donne un score entre 0 et 100, 100 correspondant à une personne asymptomatique. Il n'existe pas de cut-off/valeur seuil à cette échelle, mais il semblerait que des patients souffrant de tendinopathie d'Achille ne descendent pas sous le score de 24, que le score moyen de la population atteinte de TA se situe autour des 60. La population asymptomatique se trouve autour de 95. Le suivi de ce score peut constituer un indicateur dans la décision de reprise d'une activité physique. (27)

3.6 Diagnostic différentiel de Tendinopathie d'Achille

La région du tendon d'Achille, de la cheville et du pied est riche en structures vasculaires, nerveuses, tendineuses et musculaires. Elle est soumise à des contraintes mécaniques importantes. Cette complexité structurelle favorise l'existence de diagnostics différentiels, définis comme des affections présentant des symptômes proches de ceux d'une TA.

Parmi les diagnostics différentiels les plus fréquents, on peut citer les atteintes tendineuses voisines (tibial postérieur, LFO, LFH), les atteintes du paratendon, ainsi que des atteintes nerveuses, comme une neuropathie du nerf sural (28).

Concernant les formes insertionnelles, des pathologies de compression ou inflammatoires locales sont également évoquées : des bursites, des déformations d'Haglund, la maladie de Sever ou encore les fractures de fatigue du calcanéum (28).

Un consensus a également été créé sur six affections faisant l'objet d'une intervention ou d'une attention médicale renforcée : une rupture du tendon d'Achille, la présence d'une maladie articulaire inflammatoire systémique, un syndrome métabolique, des antécédents d'hypercholestérolémie familiale, des troubles hormonaux ainsi que des réactions secondaires à la prise de certains médicaments.

4. La course à pied

4.1 Présentation générale

La course à pied est une activité physique largement pratiquée à l'échelle mondiale, que ce soit en loisir, dans un objectif de santé ou bien de performance. De par son accessibilité, elle constitue de nos jours une des activités les plus répandues en termes de participation.

C'est dans les années 1970 qu'on observe une réelle hausse de la popularité de ce sport, on parle d'ailleurs du terme « Running boom of the 70's » à l'image du « Baby-boom » post guerre. Le nombre de participants à des courses à travers le monde n'a alors cessé d'augmenter. Dans les années 2000, une seconde explosion du nombre de coureurs à pied a lieu et se place finalement comme l'activité la plus populaire dans le monde en termes de participation.

Cependant, cette démocratisation s'accompagne également d'une augmentation du nombre de pathologie liée à la pratique, parmi lesquelles le tendon d'Achille joue un rôle important.

4.2 Cycle de course : les phases de la course à pied

En course à pied, deux grandes phases sont distinguées : la phase d'appui, « Stance phase », et la phase de suspension, « Swing phase ». Un cycle de course correspond à l'intervalle entre deux contacts consécutifs d'un même pied au sol. [ANNEXE A]

4.2.1 La phase d'appui, « Stance phase »

Elle représente environ 60 % d'un cycle de course complet, et se divise en deux sous-phases : l'amortissement (« initial contact ») et la propulsion (« Toe off »). (29,30)

La phase d'amortissement est assurée par des structures passives (os, ligaments, fascia, coussinet graisseux ...) et des structures actives, notamment musculaires et tendineuses. La répartition des forces ainsi que les représentations cinématiques sont différentes selon le pattern d'attaque du pied utilisé par le coureur. Après cette phase, le pied déroule progressivement au sol.

La phase de propulsion débute dès que le centre de gravité passe devant la jambe d'appui. À ce moment, le pied évolue d'un mouvement de pronation à un mouvement de supination, permettant de rigidifier le pied pour une transmission des forces efficace. Une flexion plantaire de cheville réalisée par le système musculosquelettique permet une propulsion du corps vers l'avant. (29)

Cette phase constitue un moment clé en termes de contraintes mécaniques.

4.2.2 La phase de suspension, « Swing Phase »

Elle complète la phase précédente, en représentant 40 % du cycle de course total. Elle commence juste après le décollement du pied. Durant cette phase, où aucun contact au sol n'est observé, un ensemble de synergie musculaire permettent le maintien du coureur et ces articulations stables. Cela prépare la transition vers la phase de contact suivante, assurant la transition vers un nouveau cycle. (29)

4.3 Facteurs biomécaniques de la course à pied

4.3.1 Définition

Les facteurs biomécaniques correspondent à l'ensemble des paramètres cinétiques, cinématiques et spatio-temporels décrivant le mouvement du coureur ainsi que ses interactions avec le sol. Ils permettent l'analyse des contraintes mécaniques appliquées au système musculosquelettique. Ces paramètres sont spécifiques à chaque sport. En course à pied, ils

constituent des leviers d'adaptation pour la prévention et la gestion de blessures mais également dans l'optimisation des performances sportives. (31)

4.3.2 Paramètres spatio-temporels

En course à pied, la cadence correspond au nombre de pas réalisés par minute. Une cadence de 160 pas par minute (ppm) correspond donc à 160 impacts au sol, soit 80 cycles de course par pied. (32)

Une cadence de 180 ppm est fréquemment présentée comme une valeur référence/optimale en littérature et en pratique.(22) En revanche, il est nécessaire de rappeler que la cadence est un paramètre propre à chaque individu. La cadence s'adaptera en fonction d'autres facteurs tels que de la vitesse, la fatigue accumulée dans une course ou un entraînement, des caractéristiques anthropométriques comme la taille et le poids, l'âge ou encore de l'expérience intrinsèque en course à pied. La cadence est également étroitement liée à la longueur de la foulée .(33)

La vitesse correspond à la distance parcourue en unité de temps. En course à pied, le kilomètres par heure (« km/h ») est généralement utilisé pour la qualifier. En pratique, il est plus courant de parler d'allure, ou « pace ». Cette allure correspond au temps nécessaire pour parcourir une distance donnée, généralement en minute par kilomètre (ou par mile selon la métrique utilisée) et se présente sous la forme « min/km ».

Le temps de contact au sol (TCS), ou ground contact time (GCT), est défini comme la durée durant lequel le pied reste en contact avec le sol durant la phase d'appui du cycle. Il est également possible d'entendre parler de l'équilibre du temps de contact au sol qui s'intéresse plus à la symétrie en établissant un pourcentage de TCS d'un pied par rapport à l'autre. (34)

4.3.3 Cinématique articulaire

La cinématique articulaire correspond à l'étude des mouvements des segments et des articulations au cours d'un cycle de course. Elle décrit généralement le pied, le genou, la hanche et le tronc du coureur durant les différentes phases du cycle, notamment en phase d'appui. Ces mouvements résultent d'une combinaison d'actions articulaires, notamment la pronation et la supination ainsi que les rotations, abduction/adduction et flexion/extension sur les différents segments. (35)

4.3.4 Le pattern d'attaque du pied

Le pattern d'attaque du pied est un paramètre cinématique, mais il est développé plus en détails du fait de sa place majeure dans la littérature en course à pied. Il désigne le mode de contact initial du pied au sol au début de la phase d'appui.

Trois patterns d'attaques du pied sont communément décrits : l'attaque talon (rearfoot strike – RFS), l'attaque médio-pied (midfoot strike – MFS) et pour finir l'attaque avant pied (forefoot strike – FFS).

Ces patterns sont différents selon les individus et ne sont pas figés dans le temps selon le niveau d'activité, des douleurs ou des blessures. La répartition des contraintes mécaniques subies par le coureur est dépendante de cette attaque du pied. (36) Chez le coureur récréatif, la majorité adopte un pattern RFS, tandis que la minorité présente un pattern FFS. Cependant, l'attaque du pied est plus ou moins consciente si bien que jusque 68% des coureurs récréatifs ne sont pas capables d'estimer correctement leur propre pattern d'attaque. (36)

4.3.5 Paramètres cinétiques

Les paramètres cinétiques regroupent l'ensemble des variables décrivant les forces et les moments s'exerçant sur le corps du coureur lors du mouvement. Les principaux paramètres sont les forces de réaction au sol, les taux de chargement et les moments articulaires. (37)

4.4 Effets de la course à pied sur la santé

La course à pied est associée à de nombreux effets sur la santé et le corps humain ; certains ont des bénéfices démontrés, notamment dans la prévention des maladies chroniques (38). En revanche, on réalise que la course à pied expose également ses pratiquants à un risque non négligeable de blessure, souvent en lien avec une surcharge et une adaptation du système musculosquelettique insuffisante. (17)

4.4.1 Bénéfices de la course à pied sur la santé

Une pratique régulière de la course à pied est associée à plusieurs bénéfices sur la santé. D'un point de vue métabolique, on retrouve une diminution de la masse corporelle et notamment du taux de masse grasse.

Sur le plan cardiovasculaire, on observe une diminution de la fréquence cardiaque de repos (- 6,7 bpm de moyenne après un an de pratique). On retrouve également des bénéfices au niveau

biologique, il existe une diminution du taux de triglycéride et du taux de cholestérol (HDL). (39)

Plus généralement, une pratique régulière de la course à pied est associée à une réduction du risque de taux de mortalité précoce, estimée entre 25 et 40%. Les coureurs vivraient en moyenne trois ans de plus que les non coureurs. On note également des effets préventifs sur l'apparition de maladies chroniques. (38)

Des effets notables sur la santé mentale, notamment en termes de relaxation et bien-être ont également été démontrés. Toutefois, les preuves actuelles restent limitées pour détailler ces effets. (40)

4.4.2 Blessures liées à la course à pied.

La population de coureurs étant très importante, elle est par conséquent exposée à une grande variété de blessures, notamment des blessures de surcharge, chez les coureurs sur route et en trail. Il existe tout de même des blessures d'origine traumatique (entorse, fracture...), d'autant plus chez les coureurs de trail sur les terrains accidentés.

On estime qu'environ 43% des coureurs se blessent au cours d'une année. (17) Le risque de blessure semble corrélé au volume d'entraînement hebdomadaire, avec une prévalence plus élevée chez les coureurs parcourant plus de 19 miles/semaine. L'intensité de la pratique influence également ce risque, montrant que les coureurs compétitifs se blessent plus que les coureurs récréatifs. (17)

Parmi ces pathologies de surcharge, les localisations principales sont : le genou (28 %), la cheville et le pied (26 %) et le segment jambier (16 %). (41)

Plus précisément, les pathologies les plus fréquentes incluent : le syndrome femoro-patellaire (17%), la tendinopathie d'Achille (10%) ainsi que le syndrome de stress médial du tibia plus communément appelé périostite (8%). D'autres atteintes sont également rapportées : l'aponévrosite plantaire (7%), le syndrome de la bandelette ilio-tibial (6%), les lésions musculaires du mollet (4%), les atteintes méniscales (4%) ou encore les fractures de fatigue (4%). (41)

Méthodologie

La forme de ce travail de recherche est une revue de littérature, impliquant donc une collecte et une évaluation objective des données de la science sur le sujet traité : les facteurs biomécaniques influençant les contraintes au tendon d'Achille chez le coureur. Afin de s'inscrire dans une démarche structurée et précise, la recherche et la sélection des études ont été réalisées dans une démarche inspirée des recommandations PRISMA. Pour ce type de travail, le modèle IMRaD est le plus généralement employé. Il regroupe une partie introduction, une partie méthodologie, une partie résultats et enfin une partie discussion. (42) L'ensemble des étapes nécessaires à cette revue a été défini de manière précise et est décrit ci-dessous.

1. Élaboration de la question de recherche et genèse du questionnement

Pour la réalisation de ce mémoire, j'ai choisi d'explorer une thématique qui m'accompagne depuis toujours et qui a fortement contribué à mon choix d'orientation professionnelle : le sport. Au cours de ma formation en masso-kinésithérapie, la course à pied s'est imposée dans mon quotidien. De plus, c'est une activité largement pratiquée et fréquemment rencontrée dans la pratique de masseur-kinésithérapeute. Cependant, une fois la thématique de la course à pied isolée, il fallait trouver une problématique pertinente et surtout utile à ma future pratique professionnelle. La course à pied expose à de nombreuses pathologies dites de surcharge/surutilisation (17), ce qui m'a conduit à orienter ma réflexion vers l'une d'entre elles.

Étant donné mon expérience personnelle, mes stages cliniques et les enseignements théoriques reçus, j'ai choisi la tendinopathie d'Achille chez le coureur à pied comme base de sujet. Ce mémoire est pour moi une excellente manière d'élargir mes connaissances sur ce que je pense connaître, mais également de les ouvrir sur des thématiques que je ne connais pas.

Ce processus de réflexion m'a permis d'identifier une thématique plus concrète se concentrant sur les paramètres que le masseur-kinésithérapeute peut adapter chez ses patients coureurs dans un objectif de gestion des tendinopathies d'Achille. Sur cette base, plusieurs raisonnements se sont établis, le premier étant de comparer la gestion de la course à pied dans le cas d'une tendinopathie d'insertion/enthésopathie comparativement à la gestion dans le cas d'une tendinopathie d'Achille corporéale. Pour ce travail, j'avais la volonté de faire une revue de littérature, cependant je n'ai pas trouvé assez de ressources scientifiques pour exploiter cette idée, m'obligeant à regrouper les différentes tendinopathies d'Achille ensemble.

Des recherches plus approfondies m'ont permis de comprendre qu'une problématique qui s'interroge sur « les paramètres » de la course à pied à moduler était beaucoup trop large. En effet, cette approche aurait fourni un nombre de résultats trop élevé m'exposant à un flou méthodologique certain. Afin de structurer cette réflexion, j'ai catégorisé, par la lecture d'articles, trois grandes sous-catégories à ces paramètres, m'amenant au résultat suivant :

- Les paramètres biomécaniques : ils correspondent à l'ensemble des paramètres cinétiques, cinématiques et spatio-temporels décrivant le mouvement du coureur ainsi que ses interactions avec le sol. Ils permettent l'analyse des contraintes mécaniques appliquées au système musculosquelettique. (31)
- Les facteurs environnementaux : ils regroupent les éléments externes au coureur, mais exerçant une influence sur son système lors de son activité, parmi lesquels on peut retrouver le type de terrain, la température, l'équipement, la météo ou encore le chaussage.
- La charge d'entraînement : elle correspond à l'ensemble des contraintes imposées par la pratique de la course à pied dans ses aspects pratiques et physiologiques : le volume, la durée d'entraînement, l'intensité ou encore la progressivité.

Parmi ces trois catégories, les facteurs environnementaux et la charge d'entraînement sont celles où je me sentais déjà le plus à l'aise sur la théorie et la pratique. En ce qui concerne les paramètres biomécaniques, je n'avais que peu d'informations, mis à part des recommandations autour de la cadence et des différents types d'attaque du pied mais sans établir de lien direct avec la TA. De plus, en stage, j'ai déjà pu réaliser des analyses de la course à pied en filmant au ralenti des coureurs sur tapis, mais il m'était compliqué d'analyser celles-ci car je manquais d'informations sur cette biomécanique de course. Cette observation a renforcé mon intérêt pour cette thématique, en soulignant un manque de compréhension personnel dans un domaine fréquemment évoqué.

Ce travail s'oriente donc vers l'analyse des paramètres biomécaniques de la course à pied comme potentiel levier d'action dans la prise en charge des coureurs souffrant de tendinopathie d'Achille.

La question de recherche retenue est donc la suivante :

Quels paramètres biomécaniques de la course à pied le masseur-kinésithérapeute peut-il adapter dans la prise en charge des coureurs atteints de tendinopathie d'Achille ?

À travers cette question de recherche, l'objectif principal de ce travail est d'identifier des paramètres biomécaniques de la course à pied exerçant une influence sur la tendinopathie d'Achille et pouvant être modulés en pratique par le masseur-kinésithérapeute.

La réflexion face à cette question conduit à établir plusieurs hypothèses concernant les possibles résultats que cette revue pourrait mettre en avant :

- H1 : Aucun paramètre biomécanique ne semble avoir un rôle pertinent en kinésithérapie pour la gestion des coureurs souffrant de tendinopathie d'Achille.
- H2 : Certains paramètres biomécaniques semblent associés à la tendinopathie d'Achille mais ne sont pas accessibles à la modification par le masseur-kinésithérapeute.
- H3 : Certains paramètres biomécaniques modifiables influencent la charge appliquée au tendon d'Achille et sont des leviers d'action pertinents en pratique clinique.

Ces hypothèses permettent à la fois une exploration des facteurs associés à la pathologie tout en faisant le lien avec la pratique clinique.

2. Outils de formulation

Pour formuler la question de recherche, le modèle standardisé **PICO** a été utilisé. Cet acronyme est fréquemment utilisé pour répondre aux questions quantitatives. (43)

P : Population/Patient/Problem (population/patient/problème)

I : Intervention (intervention ou stratégie de prise en charge)

C : Comparaison (comparateur)

O : Outcome (résultats/critères de jugement)

Cette formulation me permettra d'obtenir des résultats pertinents et scientifiquement fiables en lien avec ma revue. Mon « **P** » permet de déterminer la population cible, ici les coureurs à pied sur route adultes sans critère de niveau présentant ou non une tendinopathie d'Achille, afin d'inclure à la fois des études observationnelles et expérimentales. Le choix de limiter cette population aux adultes est d'éviter l'exposition aux pathologies de croissance. Le « **I** » correspond à l'observation et/ou à la modification des paramètres biomécaniques de la course. Le **C** correspond soit à l'absence de modification, soit à la comparaison entre des paramètres biomécaniques dans différents groupes de coureurs ou dans différentes conditions. Pour finir, le **O** correspond à la variation de la charge appliquée au tendon d'Achille ou des différences entre les groupes.

Au format **PICO** initial, il est intéressant d'ajouter le « **S** », permettant d'inclure les schémas d'études retenus dans ce travail, donnant ainsi l'outil **PICOS**. (42) Dans cette revue, le « **S** » inclut les études expérimentales biomécaniques, les études observationnelles, les études comparatives ainsi que les revues systématiques avec ou sans méta-analyses.

Le « **C** » n'est pas systématiquement applicable en recherche, certaines études ne reposant pas sur une logique de comparaison stricte. (42)

Tableau 1 : Outil PICOS appliqué à la question de recherche

« Quels paramètres biomécaniques de la course à pied le masseur-kinésithérapeute peut-il adapter dans un objectif de gestion des coureurs atteints de tendinopathie d'Achille ? »	
P	Coureurs adultes, présentant ou non une tendinopathie d'Achille
I	Observation et/ou modification des paramètres biomécaniques de la course à pied
C	Absence de modification, comparaison entre groupes, conditions ou paramètres biomécaniques
O	Variation de la charge tendineuse, variation des paramètres entre les groupes
S	Études expérimentales biomécaniques, études observationnelles, études comparatives, revues systématiques ou méta-analyses

3. Mots clés et MeSH Terms

Les mots clés utilisés dans cette revue sont exclusivement des termes anglais. Une partie a été traduite à partir du site HeTop ou d'un dictionnaire « français-anglais », tandis que l'autre partie a été acquise à partir de la lecture d'articles scientifiques en rapport avec la thématique de cette revue. L'ensemble des mots-clés retenus ne correspondent pas à des MeSH Terms. En effet, « MeSH Terms » est un vocabulaire contrôlé utilisé dans PubMed et n'a pas d'équivalent pour tous les termes. Ainsi les termes retenus sont considérés comme des mots-clés libres (free text), permettant un nombre de résultats plus large et moins exclusif.

En français, ils correspondent à : Tendon d'Achille, Tendinopathie d'Achille, Course à pied, courir, coureur, biomécanique, cinétique, cinématique, cadence, foulée, temps de contact au sol, pattern d'attaque du pied, charge tendineuse, vitesse.

En anglais, leur traduction donne les mots-clés suivants : Achilles Tendon, Achilles Tendinopathy, running, run, runner, biomechanics, biomechanical, kinematics, kinetics, step rate, stride frequency, ground contact time, foot strike pattern, loading rate, speed.

Tableau 2 : Synthèse des mots-clés

Termes français	Termes anglais	Termes retenus	Justification
Tendon d'Achille, Tendinopathie d'Achille	Achilles Tendon, Achilles Tendinopathy	Achilles Tendon, Achilles Tendinopathy	La sélection d'un terme diminuerait le nombre de résultats car certains articles s'intéressent au tendon d'Achille sans qu'il soit pathologique.
Course à pied, courir, coureur	running, run, runner	running, run, runner	L'utilisation des 3 termes permet de ne pas exclure d'articles.
biomécanique, cinétique, cinématique, cadence, foulée, temps de contact au sol, pattern d'attaque du pied, charge tendineuse, vitesse.	biomechanics, biomechanical, kinematics, kinetics, cadence, step rate, stride frequency, foot strike, strike pattern, ground contact time, ankle, plantarflexion, dorsiflexion, loading rate, speed	biomechanics, biomechanical, kinematics, kinetics, cadence, step rate, stride frequency, foot strike, strike pattern, ground contact time, ankle, plantarflexion, dorsiflexion, loading rate, speed	L'inclusion exclusive de termes biomécaniques spécifiques, plutôt que généraux entraîne une diminution du nombre de résultats (-82 articles dans l'équation de recherche finale.) En revanche la combinaison des termes spécifiques et généraux permet d'augmenter ce nombre.

4. Les moteurs de recherche

Afin de répondre à la problématique établie précédemment, trois moteurs de recherche ont été retenus pour établir la base de la recherche bibliographique. Les principaux critères de choix sont l'absence de limite concernant le nombre d'opérateurs booléens et leur pertinence dans les domaines médicaux et des sciences du sport.

Ces bases de données permettent un accès à des articles scientifiques et des données de la science fiables et facilement accessibles.

- **PubMed®** est la base de données de référence en ce qui concerne les domaines de la biologie, de la santé et de la médecine.
- **SPORTDiscus®** permet de cibler plus précisément l'aspect relatif aux sciences du sport et de l'exercice ; ce qui le rend pertinent au regard de notre problématique.

- **Scopus®** est également une base de données scientifique large, regroupant beaucoup de thématiques et permettant de recroiser les résultats de PubMed afin d'éviter l'omission de données pertinentes.

Après avoir sélectionné les mots-clés pertinents pour répondre à la problématique, j'ai consulté les bases de données citées ci-dessus pour explorer la littérature disponible à ce jour.

5. Stratégie de recherche

Afin de limiter le risque d'exclusion de données pertinentes, une stratégie combinant à la fois les termes biomécaniques généraux et spécifiques a été choisie. Le « **P** » du **PICOS** n'apparaît pas explicitement mais est implicite par l'identification du sport, de la pathologie et de la région anatomique dans mon équation. Les équations de recherche ont été construites à l'aide d'opérateurs booléens dans l'onglet recherche avancée. Les opérateurs booléens sont : « AND » pour associer plusieurs termes entre eux, « OR » pour croiser les termes et inclure des synonymes, et « NOT » pour en exclure certains.

L'équation de recherche finale est donc :

((Achilles tendon) OR (Achilles tendinopathy)) AND ((running) OR (runner) OR (run)) AND ((biomechanics) OR (biomechanical) OR (kinematics) OR (kinetics) OR (cadence) OR (step rate) OR (stride frequency) OR (foot strike) OR (strike pattern) OR (ground contact time) OR (ankle) OR (plantarflexion) OR (dorsiflexion) OR (loading) OR (stiffness))) NOT ((rat) OR (rupture) OR (repair) OR (shoes) OR (injection) OR (shockwave) OR (sprain) OR (minimalist))

Aucun filtre n'a été ajouté concernant les schémas d'études à la recherche initiale, afin de ne pas exclure d'études potentiellement pertinentes mal indexées dans les bases de données. La sélection des études est secondaire, selon les critères d'inclusion et d'exclusion retenus. Aucune restriction de date n'a été appliquée.

Tableau 3 : récapitulatif des stratégies de recherche

Moteur de recherche	N° de recherche	Mots-clés	Résultats	Date de la recherche
PubMed	1	(Achilles tendon) OR (Achilles tendinopathy)	15,135	05/01/2026
	2	[1] AND ((running) OR (runner) OR (run))	828	
	3	[2] AND ((biomechanics) OR (biomechanical) OR (kinematics) OR (kinetics) OR (cadence) OR (step rate) OR (stride frequency) OR (foot strike) OR (strike pattern) OR (ground contact time) OR (ankle) OR (plantarflexion) OR (dorsiflexion) OR (loading) OR (stiffness))	585	
	4	[3] NOT ((rat) OR (rupture) OR (repair) OR (shoes) OR (injection) OR (shockwave) OR sprain) OR (footwear) OR (minimalist))	357	
SPORTDiscus	1	(Achilles tendon) OR (Achilles tendinopathy)	5,173	
	2	[1] AND ((running) OR (runner) OR (run))	700	
	3	[2] AND ((biomechanics) OR (biomechanical) OR (kinematics) OR (kinetics) OR (cadence) OR (step rate) OR (stride frequency) OR (foot strike) OR (strike pattern) OR (ground contact time) OR (ankle) OR (plantarflexion) OR (dorsiflexion) OR (loading) OR (stiffness))	379	
	4	[3] NOT ((rat) OR (rupture) OR (repair) OR (shoes) OR (injection) OR (shockwave) OR sprain) OR (footwear) OR (minimalist))	260	
Scopus	1	(Achilles tendon) OR (Achilles tendinopathy)	20,406	
	2	[1] AND ((running) OR (runner) OR (run))	1080	
	3	[2] AND ((biomechanics) OR (biomechanical) OR (kinematics) OR (kinetics) OR (cadence) OR (step rate) OR (stride frequency) OR (foot strike) OR (strike pattern) OR (ground contact time) OR (ankle) OR (plantarflexion) OR (dorsiflexion) OR (loading) OR (stiffness))	701	
	4	[3] NOT ((rat) OR (rupture) OR (repair) OR (shoes) OR (injection) OR (shockwave) OR (sprain) OR (footwear) OR (minimalist))	140	
Équation de recherche finale		((Achilles tendon) OR (Achilles tendinopathy)) AND ((running) OR (runner) OR (run)) AND ((biomechanics) OR (biomechanical) OR (kinematics) OR (kinetics) OR (cadence) OR (step rate) OR (stride frequency) OR (foot strike) OR (strike pattern) OR (ground contact time) OR (ankle) OR (plantarflexion) OR (dorsiflexion) OR (loading) OR (stiffness)) NOT ((rat) OR (rupture) OR (repair) OR (shoes) OR (injection) OR (shockwave) OR (sprain) OR (footwear) OR (minimalist))		

6. Diagramme de flux

6.1 Critères d'éligibilité

Le premier critère retenu pour l'inclusion dans la recherche était l'accès aux résumés des articles consultés. L'analyse des titres et de ces résumés a permis l'exclusion des articles ne répondant pas aux critères d'inclusion et d'exclusion présentés ci-dessous :

Pathologie : Les articles retenus doivent évoquer la tendinopathie d'Achille ou le tendon d'Achille, dans le contexte de la course à pied.

Population : La population retenue doit être majeure (≥ 18 ans), pratiquant la course à pied sur route ou tapis de course peu importe le niveau de pratique. Sont exclues les études animales, pédiatriques et s'intéressant à d'autres sports.

Intervention : L'intervention étudiée doit concerner l'analyse ou l'adaptation de paramètres biomécaniques de la course à pied. Ces paramètres incluent notamment les paramètres cinématiques, cinétiques et spatio-temporels tels que la cadence, l'attaque du pied, la cinématique de cheville, le temps de contact au sol et d'autres paramètres identifiés. Les études ne traitant pas directement de paramètres biomécaniques ou portant sur des aspects physiologiques, métaboliques (économie de course) ou comparant uniquement des outils de mesure sont exclues. Sont également exclues les études s'intéressant aux paramètres biomécaniques dans un objectif de performance afin de rester cohérent avec l'objectif clinique de ce travail.

Comparateur : Le comparateur peut prendre plusieurs formes ; il peut correspondre aux conditions habituelles, à différents paramètres biomécaniques entre eux ou encore à des différences intrinsèques à un paramètre spécifique. Cependant, l'absence d'un comparateur explicite n'a pas pour autant constitué un critère d'exclusion. (42)

Les articles rédigés dans une autre langue que le français ou l'anglais sont considérés comme dans une langue non maîtrisée et sont par conséquent aussi exclus. Les articles n'autorisant pas un accès complet et gratuit sont également exclus.

6.2 Sélection des études

Afin d'établir clairement le processus de sélection des publications incluses dans ce travail de recherche, j'ai utilisé le modèle PRISMA notamment pour l'élaboration du diagramme de flux.

L'inscription de mon équation de recherche finale dans les trois moteurs de recherche sélectionnés m'a permis d'identifier 759 articles. Leur répartition est la suivante : PubMed (N=357), SPORTDiscus (N=142) et Scopus (N=260). L'enregistrement de ces résultats a été réalisé via le logiciel Zotero dans une collection spécifique à ce travail. Zotero permet de repérer les doublons et de les fusionner. Ces fusions d'articles m'ont permis d'éliminer 173 articles, laissant un total de 586 articles.

Parmi ces articles, un certain nombre a été exclu après lecture des titres et des résumés (N=495), car ils ne correspondaient pas aux critères d'inclusion définis (intervention, population, critères de jugement). De plus, les articles dans une langue non maîtrisée s'élèvent à 25. Cette élimination permet de retenir 43 articles pour relecture complète. La lecture complète de ces articles a permis de sélectionner 7 articles essentiels à ce travail. Le diagramme de flux réalisé selon les recommandations PRISMA est présenté en annexe. [Annexe B]

Un biais de sélection est possible, compte tenu du processus de sélection des études.
(42)

7. Échelle de qualité méthodologique

Pour les sept études retenues, des échelles de qualité méthodologique différentes sont utilisées. Les échelles de qualité méthodologique permettent d'interroger les biais, la validité interne et la validité externe d'une étude et, par conséquent, d'établir un degré de confiance accordé aux résultats présentés dans ces études.

L'échelle "Downs and Black checklist" est utilisée dans les études expérimentales, randomisées ou non, notamment en science du sport et en biomécanique. Sa passation permet d'obtenir un score de qualité méthodologique entre 0 et 28 points. Cette échelle est également utilisée pour les études observationnelles de notre étude. Cependant, il n'existe pas de valeur seuil, ou cut-off, clairement établie, ce qui laisse donc une part d'interprétation en lien avec le design des études. (44) En effet, le design non randomisé (et non randomisable) des études sélectionnées entraîne une diminution du score de qualité méthodologique, mais celui-ci est à interpréter en prenant en compte cette spécificité. [ANNEXE C]

L'échelle AMSTAR-2 est l'échelle majoritairement utilisée pour évaluer la qualité méthodologique des revues systématiques avec ou sans méta-analyse. Elle est composée de 16 items, certains étant considérés comme critiques, et donne un niveau de confiance situé entre « élevé » et « critiquement faible ». [ANNEXE D] (45)

Résultats

Dans le but de synthétiser l'ensemble des résultats obtenus à partir des études sélectionnées, un tableau récapitulatif de celles-ci a été réalisé pour y intégrer les informations principales : le PICO, les auteurs, la date de publication, les principaux résultats, les biais identifiés, le score de qualité méthodologique et les validités interne et externe. [ANNEXE E à K]

1. Présentation des études

1.1 Description des études

Sept études ont été sélectionnées afin de répondre à notre problématique initiale. Elles ont été publiées entre 2016 et 2025. Parmi ces sept études, on retrouve :

- Une revue systématique avec méta-analyse publiée par *Sancho et al.* en 2019 (46) ;
- Deux études prospectives observationnelles et comparatives, publiées par *Skypala et al.* en 2023 (47) et *Aubol et Milner* en 2024. (48)
- Les quatre dernières études sont des études expérimentales biomécaniques analysant les contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille lors de la course à pied. Celles-ci ont été publiées par *Lyght et al.* en 2016 (49), *Aubol et al.* en 2025 (50), *Starbuck et al.* en 2021 (51) et *Nishiguchi et al.* en 2025. (52)

1.2 Qualité méthodologique des études incluses

La qualité des études incluses est dans l'ensemble modérée à élevée. Pour les études évaluées par l'échelle de qualité méthodologique « Downs and Black Checklist », les scores obtenus varient entre 17/28 et 21/28. [ANNEXE L et M]

Les principales limites rencontrées sont en lien avec le design des études. En effet, les études expérimentales biomécaniques sont rarement en aveugle et s'appuient sur des échantillons faibles, limitant les calculs de puissance. De plus, les conditions d'analyses en laboratoire restent un frein à la validité externe.

Ces spécificités liées à la méthodologie des études doivent être prises en compte dans l'interprétation des scores obtenus.

Tableau 4 : Synthèse des qualités méthodologiques des études incluses

Études	EQM utilisée	Score obtenu	Informations
Sancho et al. (46)	AMSTAR 2	Qualité modérée	Bon niveau global mais item critique 7 pas validé : absence de liste des études exclues
Nishiguchi et al. (52)		18/28 Qualité modérée	Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude intra-sujet Validité externe limitée
Skypala et al. (47)		21/28 Qualité élevée	Bonne validité externe mais blessures auto-déclarées, condition en laboratoire et pertes de participants Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude
Starbuck et al. (51)		19/20 Qualité modérée	Pas de calcul de puissance Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude intra-sujet Validité externe limitée
Aubol et al. (50)		20/28 Qualité élevée	Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude intra-sujet
Aubol et Milner (48)		18/28 Qualité modérée	Absence de calcul de puissance Absence d'ajustement entre les groupes Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude
Lyght et al. (49)		19/28 Qualité modérée	Absence d'aveuglement en lien avec le design de l'étude Validité externe limitée

2. Description des populations

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.*, 16 études s'intéressant à la biomécanique de course ont été incluses : 14 études cas-témoins et 2 études prospectives. Les populations étudiées sont des coureurs adultes (> 18 ans) athlètes ou récréatifs. Ces études comparent un groupe de coureurs souffrant d'une tendinopathie d'Achille à un groupe sain. (46)

L'étude prospective réalisée par *Skypala et al.* regroupe 103 participants suivis une année après des mesures initiales de leur schéma de course. À l'issue de ce suivi, un premier groupe sain composé de 77 participants et un groupe ayant développé une atteinte au tendon d'Achille liée à la course à pied (AT RRI : achilles tendon running-related injuries) incluant 26 participants ont été mis en place. Les sujets inclus dans l'étude sont des coureurs récréatifs à bas volume d'entraînement (< 51 km/semaine). Aucun des participants n'avaient d'antécédent de RRI. L'étude comprend 46 hommes et 57 femmes. L'âge moyen du groupe sain est de 36.89

± 8.45 contre 35.45 ± 8.86 pour le groupe AT RRI. Seul le membre inférieur droit est analysé. (47)

L'étude expérimentale réalisée par *Lyght et al.* s'intéresse à 19 participantes pratiquant au minimum 10 miles/semaine. L'âge moyen est de $21,5 \pm 1,3$ ans. Parmi ces 19 coureuses, 14 (74%) rapportent une attaque de pied taligrade (RFS) et 5 (26%) une attaque « avant-pied » (FFS). Les participantes enceintes, présentant des risques cardio-vasculaire, des antécédents de chirurgie ou encore des antécédents de blessures aux membres inférieurs ont été exclues. (49)

Dans l'étude de *Nishiguchi et al.* 20 hommes adultes en bonne santé ont été inclus pour étudier l'effet des différentes attaques du pied sur les contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille (ainsi que le fascia plantaire et le complexe femoro-patellaire). L'âge moyen du groupe est de $21,7 \pm 1,1$ ans. Les critères d'inclusion sont l'absence d'antécédent de TA, de fasciite plantaire ou de douleur femoro-patellaire et chirurgie aux membres inférieurs. Au regard de nos critères d'inclusion. Il est important de souligner que cette étude n'explicite pas le fait que ces participants soient coureurs mais insiste sur le fait que le groupe soit « en bonne santé » sous entendant qu'ils sont aptes à courir. (52)

L'étude expérimentale d'*Aubol et al.* a inclus 30 participants adultes pratiquant la course à pied et étant exclusivement d'attaque talon (RFS), soit qu'au moins 90% des contacts initiaux du pied au sol soient réalisés par le talon. Aucun antécédent de blessures sur le tendon d'Achille ne devait être rapporté avant ou pendant l'étude. (50)

L'étude expérimentale réalisée par *Aubol et Milner* a recruté 14 participants, tous des coureurs masculins âgés de 18 à 60 ans, courant depuis au moins un an et plus de 16 kilomètres par semaine. Deux groupes ont été identifiés, avec 7 coureurs dans chaque groupe : un premier sain et le second avec des coureurs souffrant ou ayant souffert de tendinopathie d'Achille. De plus, les coureurs recrutés étaient exclusivement des coureurs d'attaque talon (RFS). La moyenne d'âge du groupe tendinopathie d'Achille est de 37 ± 13 ans et celle du groupe sain est de $32,6 \pm 8,6$ ans. Le volume de course hebdomadaire du groupe TA est plus élevé : 63 ± 31 km/semaine contre 32 ± 13 km/semaine pour le groupe sain. (48)

Dans l'étude de *Starbuck et al.* (51), 20 athlètes adultes d'endurance de haut niveau (définis par le temps sur 10km) ont été inclus. Cette étude vise à observer les contraintes appliquées au tendon d'Achille (et l'articulation femoro-patellaire) selon la vitesse de déplacement. Le groupe de 20 athlètes était composé de manière équitable ; 10 hommes et 10

femmes pour une moyenne d'âge de $25,1 \pm 7,6$ ans. Aucun antécédent de blessure n'était rapporté sur les six derniers mois parmi ces coureurs.

Ainsi, les populations étudiées sont toutes composées d'adultes physiquement actifs et de coureurs novices ou confirmés. Les effectifs sont variables selon les méthodologies employées.

3. Définition et critères diagnostiques de la tendinopathie d'Achille

La définition et les critères diagnostiques de la TA varient selon les études incluses dans ce travail, constituant un élément important à considérer dans l'interprétation des résultats.

Dans l'étude de *Skypala et al.* (47), la survenue d'une pathologie du tendon d'Achille est identifiée par des auto-questionnaires hebdomadaires reposant sur une définition standardisée « limitation ou arrêt de la pratique durant au moins 7 jours ». Les participants rapportant l'apparition de symptômes au tendon d'Achille en lien avec la course à pied sont inclus dans le groupe AT RRI. Cette approche de la TA repose sur une auto-déclaration des symptômes.

À l'inverse, *Aubol et Milner* distingue deux groupes dès le début de l'étude : un groupe sain et un groupe avec ou ayant eu une TA. Cependant, les critères cliniques utilisés pour poser le diagnostic de TA ne sont pas détaillés. (48)

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.*, les critères diagnostiques varient selon les études incluses. Les diagnostics reposent majoritairement sur des critères cliniques (douleurs, palpation, raideur), des antécédents ou encore des (auto-)questionnaires. (46)

Les études expérimentales s'intéressent exclusivement à des sujets sains pour étudier les contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille. (46–49)

L'absence d'une définition homogène de la TA entre les différentes études constitue une limite importante pour la comparabilité et l'extrapolation des résultats.

4. Protocole d'analyse biomécanique et critères d'évaluation

En s'intéressant aux différents protocoles d'analyse des paramètres biomécaniques des études sélectionnées, on remarque une certaine hétérogénéité expliquée par des objectifs et des paramètres biomécaniques explorés différents. L'ensemble des études utilise une analyse

instrumentée de la course à pied pour chiffrer et interpréter les contraintes mécaniques subies par le tendon d'Achille ou les altérations biomécaniques à l'origine des TA.

La méta-analyse de *Sancho et al.* (46) incluse dans ce travail n'impose pas un protocole d'analyse biomécanique unique dans les critères d'inclusion. Par conséquent les 16 études (44) qui les composent n'ont pas un protocole défini; ce point est pris en compte dans les risques de biais. Les analyses sont réalisées soit en laboratoire sur tapis roulant, soit en extérieur sur des distances choisies à des vitesses contrôlées ou auto-sélectionnées. Les analyses sont majoritairement tridimensionnelles, via des capteurs optocinétiques électroniques couplés à plateformes de force. Les études concernant le saut ne sont pas traitées dans ce travail, réduisant donc le nombre d'article réellement pertinent à 12.

L'étude d'*Aubol et Milner* (48), comparant des coureurs sains et des coureurs souffrants de TA, se concentre sur les mécanismes biomécaniques spécifiques à l'attaque talon, notamment les charges et les déformations appliquées au tendon. Pour ce faire, huit caméras optoélectroniques couplées à des plaques de force ont été utilisées sur une distance de 17 mètres en laboratoire à une vitesse présélectionnée de 3,7 m/s. La tenue et les chaussures étaient standardisées.

Lyght et al (49) ont examiné l'influence du pattern d'attaque du pied ainsi que l'influence de la cadence sur les contraintes subies par le tendon d'Achille. Le marqueur de suivi utilisé était une mesure de section transversale du tendon par échographie pré et post analyses. Les tests ont été réalisés sur une distance de 20 mètres à une vitesse imposée entre 3.33 m/s et 3.68 m/s, avec un modèle de chaussure standardisé. Des analyses étaient réalisées à différentes cadences indiquées par un métronome. Pour gérer l'attaque du pied, des plaques de pression plantaire intra-chaussures ont été utilisées. Les analyses tridimensionnelles ont été collectées par 15 caméras optoélectroniques et des plateformes de force.

Pour leur étude, *Nishiguchi et al.* ont fait courir les participants en laboratoire sur une piste de 15 mètres équipée de plateformes de force à 10 km/h $\pm$ 5 %. Les trois schémas d'attaque de pied (RFS, MFS, FFS) ont été étudiés. Pour chaque pattern de course, le participant avait le droit à 5 essais. L'ordre de test des différents patterns était randomisé, une période de repos entre chaque série était obligatoire pour écarter les biais en lien avec la fatigue. En plus des plateformes de forces, des capteurs tridimensionnel infrarouge ont été utilisés avec des marqueurs réfléchissants sur les segments corporels. (52)

Pour étudier l'effet du temps de contact au sol sur les contraintes appliquées au tendon achilléen chez les coureurs RFS, *Aubol et al.* (50) ont réalisé des essais de course sur une distance de 180 mètres à vitesse contrôlée (3,0 m/s). Six conditions de course ont été étudiées variant le temps de contact au sol (faible, préférentiel et élevé) et la cadence (libre ou imposée par métronome). Pour la mesure des forces, des semelles enregistrant les interactions avec le sol ont été utilisées. Ces mesures s'intéressaient principalement à la force maximale du tendon d'Achille, son impulsion et la charge cumulative tendineuse.

L'étude réalisée par *Skypala et al.* (47) s'organise autour d'un examen initial en laboratoire dans des conditions standardisées puis un suivi prospectif sur 12 mois permis par un questionnaire en ligne hebdomadaire permettant de rapporter les retours des coureurs. À partir de ces retours, une comparaison des données biomécaniques initiales entre les différents groupes étaient réalisée.

L'étude de *Starbuck et al.* (51) expérimentale s'intéresse à la modification de la charge et les contraintes subies par le tendon d'Achille à différentes vitesses de course. Pour ce faire, des tests en conditions extérieures ont été réalisés à quatre vitesses progressives : 3,3m/s ; 3,9 m/s ; 4,8 m/s ainsi que 5,6 m/s. Un ensemble de paramètres a été enregistré par des systèmes de capture, avec des marqueurs positionnés sur les segments des coureurs, ainsi que des plateformes de force. La même démarche a également été appliquée pour le complexe femoro-patellaire mais cette partie n'a pas été retenu dans le cadre de notre travail.

5. Critères de jugement primaire

Les critères de jugements principaux retenus dans ce travail sont des paramètres biomécaniques de la course à pied.

Parmi eux, on retrouve des paramètres cinématiques, correspondant aux amplitudes articulaires et aux positions segmentaires. Ici, on s'intéresse aux positions d'attaque du pied et de la cheville (RFS, FFS, MFS), du genou et de la hanche. (46–49,51,52)

Sont également inclus les paramètres cinétiques, soit les forces appliquées au tendon achilléen et aux articulations, ainsi que les moments articulaires (joint moment). (46,49–52)

Pour finir, les études sélectionnées s'intéressent à des paramètres spatio-temporels : la cadence de foulée, le temps de contact du pied au sol (TCS) et la vitesse de déplacement ; susceptibles d'influencer la charge tendineuse. (49–51)

Il est important de souligner que l'hétérogénéité méthodologique des études limite le regroupement statistique, l'analyse et l'interprétation des résultats.

5.1 Paramètres biomécaniques associés à la tendinopathie d'Achille

5.1.1 Cinématique

a) Position de cheville et pied

Dans la méta-analyse de Sancho et al (46), quatre études analysant un total de 29 variables cinématiques de la cheville et du pied ont été incluses, six ont pu être regroupées en méta-analyse.

Les effets observés sont faibles et non significatifs pour l'ensemble de ces variables : la dorsiflexion maximale de cheville ; l'amplitude totale de dorsiflexion ; l'éversion maximale ; la vitesse maximale d'éversion ; le temps pour atteindre le pic d'éversion et l'amplitude totale d'éversion. (46)

Cependant, des résultats significatifs sont rapportés sur des études isolées : une augmentation de l'éversion de l'arrière-pied à la phase de propulsion (SMD= -1,57 [-2,47 ; -0,68]) et une augmentation de la durée de pronation (SMD = 1,67 [0,76 ; 2,58]) dans le groupe TA montrent une ES élevée (SMD> 1). La vitesse maximale de dorsiflexion montre un effet modéré. (SMD = -0,61 [-1,19 ; -0,02]). (46)

Dans l'étude prospective de *Skypala et al.*, les coureurs développant une TA sur l'année présentent une dorsiflexion maximale de cheville significativement plus importante (+1,51%) en phase d'appui. (P = 0,036 ; ES modéré = 0,399) (47) Toutefois, les résultats obtenus par régression logistique ne considèrent pas cette variable comme un facteur prédictif significatif du développement d'une TA. (P > 0,05)

L'étude réalisée par *Aubol et Milner* explore deux mécanismes potentiels d'apparition des tendinopathies d'Achille par une observation des paramètres biomécaniques chez des coureurs exclusivement RFS divisés en deux groupes : sain et blessé. (48) Deux hypothèses sont évoquées sur l'origine d'apparition du mécanisme :

- Le mécanisme de « whipping » : lié à l'éversion du pied
- Le mécanisme de « tearing » : lié à la flexion dorsale et aux forces excentriques

Concernant le mécanisme de « whipping », aucune différence significative (P>0,05) n'est retrouvée entre les deux groupes sur les paramètres suivants : pic d'éversion de l'arrière-pied,

l'excursion d'éversion, la durée de l'éversion et le pic d'inversion. (48) De plus, l'analyse statistique des courbes confirme l'absence de différence durant la phase d'appui.

Pour le second mécanisme de « tearing », aucune différence significative n'est également observée. Le pic de dorsiflexion de cheville ainsi que le pic d'absorption de puissance à la cheville sont similaires entre les deux groupes. (48)

Les résultats obtenus par *Aubol et Milner* ne mettent en évidence aucune différence significative permettant de soutenir l'une de ces deux hypothèses.

b) Position de genou

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.* (46), trois études analysent un ensemble de 13 variables cinématiques du genou. Du fait de l'hétérogénéité méthodologique de ces trois études, aucune variable n'a pu être analysée sous forme de méta-analyse.

Concernant les études isolées, une seule variable montre un résultat significatif entre les deux groupes : une diminution de l'amplitude de mouvement entre le contact initial (heel strike) et l'appui intermédiaire (mid stance) (SMD = -0,88 [-1,52 ; -0,25]). Les douze autres variables ne montrent aucune différence significative.(46)

Dans l'étude prospective de *Skypala et al.*, les coureurs atteints de TA sur l'année présentent une flexion de genou au contact initial et à la phase d'appui augmenté (P = 0,010 ; ES modéré 0,630) (P = 0,034 ; ES modéré 0,497). (47) Les résultats acquis par régression logistique placent cette augmentation de la flexion de genou (en phase initial (OR = 1.162 ; P = 0,013) et en phase d'appui (OR = 1.128 ; P = 0,037)) comme un facteur prédictif significatif dans le développement des blessures au tendon d'Achille.

c) Position de la hanche

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.* (46), deux études regroupant huit variables cinématiques de hanche ont été analysées. De manière isolée, une différence modérée est considérée significative entre les groupes : une augmentation de la rotation interne de hanche lors du pic de force de réaction verticale (SMD = 0,84 [0,01 ; 1,67]) dans le groupe TA. Les autres variables ne montrent aucune différence significative.

L'ensemble de ces résultats met en évidence une absence de différences systématiques entre les coureurs sains et ceux présentant une tendinopathie d'Achille pour de nombreux paramètres biomécaniques. Cependant, certaines variables, notamment au niveau du genou et

de la cheville, semblent associées au développement de la pathologie, bien que les résultats restent hétérogènes.

5.1.2 Cinétiques

a) Force de réaction au sol et répartition des pressions plantaires

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.* (46), quatre études ont analysé un ensemble de 33 variables ; seulement trois ont pu être regroupées sous forme de méta-analyse.

Les résultats indiquent une absence de différence significative entre les groupes pour :

- le pic de force de réaction verticale (SMD = 0,44 [-0,05 ; 0,92]).
- la force horizontale de freinage (SMD = -0,28 [-0,78 ; 0,22]).
- la force horizontale propulsive (SMD = 0,32 [-0,10 ; 0,74]).

Une étude s'intéresse à la répartition des pressions plantaires selon quatre variables. Une différence est retrouvée entre les groupes, indiquant une déviation latérale du centre de pression par rapport à l'axe longitudinal du pied dans le groupe TA. (SMD = -0,94 [-1,86 ; -0,02]). (46)

b) Moments articulaires

Dans la méta-analyse de *Sancho et al.* (46), deux études ont analysé 13 variables relatives aux moments articulaires, sans pouvoir les regrouper en méta-analyse en raison de l'hétérogénéité des protocoles.

Au niveau du genou, une diminution de la rotation externe tibiale est retrouvée chez les coureurs asymptomatiques mais avec un antécédent de TA (SMD = 1,29 [0,18 ; 2,39]). (46)

Au niveau de la hanche chez les coureurs atteints de TA, on retrouve plusieurs résultats significatifs :

- une augmentation de l'impulsion d'adduction de hanche (SMD= 1,62 [0,69 ; 2,54]),
 - une augmentation de la rotation externe de hanche lors du moment externe de hanche (SMD = 1,55 [0,63 ; 2,46])
 - une augmentation de l'impulsion de rotation externe de hanche (SMD = 1,45 [0,55 ; 2,35]).
- (46)

5.1.3 Paramètres spatio-temporels

a) Pattern d'attaque du pied

Skypala et al. ne mettent pas en évidence de différence significative dans les patterns d'attaque du pied entre les groupes. ($P = 0,807$)(47)

b) Vitesse

Skypala et al. n'ont pas rapporté de différence significative dans la vitesse d'endurance auto-sélectionnée entre les groupes. ($P = 0,141$)(47)

5.2 Influence des paramètres biomécaniques modifiables sur la charge du tendon d'Achille

Face à l'hétérogénéité des résultats observationnels, les études expérimentales sont intéressantes car elles permettent d'analyser l'influence de certaines modifications biomécaniques sur la charge appliquée au tendon. En effet, en regard de l'absence de consensus clair quant au développement des TA, les études expérimentales permettent d'étudier l'impact direct des modifications biomécaniques lorsque le tendon est sain.

5.2.1 Attaque du pied

L'étude de *Nishiguchi et al.* avait pour objectif principal d'évaluer l'influence du schéma d'attaque du pied sur la charge tendineuse achilléenne selon les trois patterns connus : forefoot striker (FFS), midfoot striker (MFS) et rearfoot striker (RFS). (52)

Les résultats montrent que la force maximale exercée sur le tendon d'Achille diffère significativement selon le pattern. Les valeurs moyennes observées sont de $85,2 \pm 12,4$ N/kg pour les coureurs FFS, $80,1 \pm 12,4$ N/kg pour les coureurs MFS et $71,2 \pm 9,8$ N/kg pour les coureurs RFS, avec une ES importante ($ES = -1,25$) (52)

De plus, *Nishiguchi et al.* ont mis en évidence une diminution du pic d'impact de 26% et une diminution du taux de charge moyen de 47% chez les coureurs FFS comparativement aux coureurs RFS. (52)

Concernant l'impulsion par pas, une différence significative entre les patterns est retrouvée : $10,2 \pm 1,9$ N/kg·s chez les FFS, $9,2 \pm 1,7$ N/kg·s chez les MFS et $7,7 \pm 1,3$ N/kg·s chez les RFS ($ES = -1,54$). De manière cumulative, la charge par mile est plus élevée chez les FFS (7864 ± 940 N/kg·s), suivis des MFS (7131 ± 951 N/kg·s) et des RFS (5993 ± 803 N/kg·s), avec une ES très élevée ($ES = -2,14$). (52)

De manière concordante, *Lyght et al.* mettent en évidence une différence significative sur le pic de contrainte maximal subi par le tendon, diminuant de 24,0% dans les patterns RFS comparés au FFS avec une ES élevée ($ES = 1,12$). (49) Cette diminution est également retrouvée

pour la force achilléenne (-24,3 % ; ES = 1,10), l'allongement du tendon (-23,3 % ; ES = 1,10) ainsi que la vitesse d'étirement (-15,8 % ; ES = 0,95) (49)

Sur le plan cinématique, *Lyght et al.* ont mis en avant une augmentation de la flexion de genou (+8,2% ; ES faible = 0,19) et de la flexion plantaire de cheville chez les FFS au contact initial. (49)

5.2.2 Cadence

Pour ce paramètre mécanique, l'étude *Lyght et al.* s'est intéressée à l'impact de la cadence sur la charge tendineuse soumise au tendon d'Achille.

Dans les conditions RFS et FFS, il est observé une diminution du stress tendineux pour les cadences augmentées de 5% par rapport à la cadence préférentielle moyenne de 172,8 ppm (FFS = -3% ; RFS = -4,82 %).(49)

De manière similaire, les conditions de cadence à +5% montrent une diminution de l'étirement dans les deux patterns ; -3,7% pour les RFS et -2,8% pour les FFS.

En revanche, aucune différence significative ($P > 0,5$) sur le pic de stress et l'étirement n'est remarquée lors d'une diminution de 5%.(49)

5.2.3 Temps de contact au sol (TCS)

L'étude principale concernant le temps de contact au sol (TCS) dans ce travail est celle d'*Aubol et al.* (50)

Les analyses biomécaniques montrent que la simple consigne orale d'augmenter ou de diminuer le temps de contact du pied au sol est efficace : un TCS faible ($0,248 \pm 0,018$ s) ; un TCS préférentiel ($0,261 \pm 0,022$ s) et un TCS élevé ($0,276 \pm 0,021$ s) ($P < 0,001$). (50)

Une interaction significative entre le TCS et la cadence est également observée ($P = 0,024$) en condition de course libre avec une diminution de la cadence lors de l'augmentation du TCS. Cette interaction disparaît lorsque la cadence est imposée. (50) Par ailleurs, les six conditions expérimentales n'ont pas d'influence significative sur la vitesse ($P = 0,198$).

Aubol et al. montrent également une diminution significative de la charge cumulative appliquée au tendon d'Achille lors d'une augmentation du TCS. La charge cumulative passe de 6739 ± 1210 N·s/km en condition TCS faible à 6440 ± 1085 N·[s/km]^{1/2} en condition préférée puis à 6123 ± 992 N·[s/km]^{1/2} en condition TCS élevée. ($P < 0,001$) (50)

De manière isolée, le pic de force appliqué au tendon d'Achille est plus élevé lorsque le TCS diminue : TCS faible = $6,80 \pm 1,38$ BW, TCS modéré = $6,51 \pm 1,28$ BW et TCS élevé = $6,18 \pm 1,18$ BW. ($P < 0,001$). (50)

De manière secondaire, l'étude de *Nishiguchi et al.* s'intéressant aux patterns d'attaque du pied évoque également le temps de contact au sol et remarque un temps de contact au sol plus élevé chez les coureurs RFS ($0,250 \pm 0,020$ s) que chez les coureurs FFS ($0,241 \pm 0,027$) et les coureurs MFS ($0,237 \pm 0,020$ s) avec une taille d'effet faible à modérée ($ES = 0,29$). (52)

5.2.4 Vitesse de course

L'étude réalisée par *Starbuck et al.* constitue notre référence principale concernant l'influence de la vitesse de course sur la charge du tendon d'Achille. (51) Cette étude montre que la modification de la vitesse de course entraîne des modifications des paramètres biomécaniques de la course. L'augmentation de la vitesse de course est associée à :

- Une augmentation significative de la longueur de foulée : $v1$ (3,3 m/s) = $1,21 \pm 0,06$ m ; $v2$ (3,9 m/s) = $1,38 \pm 0,07$ m ; $v3$ (4,9 m/s) = $1,61 \pm 0,10$ m ; $v4$ (5,6 m/s) = $1,73 \pm 0,14$ m. ($P < 0,001$) (51)
- Une augmentation du temps de vol et de la cadence aux vitesses élevées $v3$ et $v4$ en comparaison aux vitesses plus lentes $v1$ et $v2$.
- Le TCS est significativement réduit lors de l'augmentation des vitesses : $v1$ (3,3 m/s) = $0,23 \pm 0,02$ s ; $v2$ (3,9 m/s) = $0,21 \pm 0,02$ s ; $v3$ (4,9 m/s) = $0,18 \pm 0,01$ s ; $v4$ (5,6 m/s) = $0,16 \pm 0,01$ s. ($P < 0,001$) (51)
- Une modification significative du « strike index », traduisant une transition progressive vers un pattern FFS lorsque la vitesse augmente : $v1 = 46,63 \pm 16,16$ % ; $v4 = 58,88 \pm 14,32$ %. ($P < 0,001$). De manière quantitative, 7 coureurs sur les 20 étaient RFS à $v1$ contre 2 RFS à $v4$. (51) Sur le plan cinématique, cette observation se confirme ; en effet *Starbuck et al.* observe une augmentation de la flexion plantaire au contact initial dans les vitesses augmentées, sans changement significatif de la flexion dorsale maximale. (51)
- Une augmentation significative des contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille :
 - Une augmentation du pic de force (de 6.46 ± 0.82 BW ($v1$) à 7.71 ± 0.73 BW ($v4$) ; $P < 0.001$)
 - Une augmentation du taux de charge (de 69.86 ± 16.62 BW/s à 109.89 ± 26.09 BW/s, $P < 0.001$). (51)

- Une augmentation de la force cumulée (de 5347.20 ± 1053.28 BW/s à $v4 = 6043.59 \pm 1127.34$ BW/s ; $P < 0.001$). (51)

Ainsi, les études expérimentales montrent que plusieurs paramètres biomécaniques modifiables influencent de manière directe la charge appliquée au tendon d'Achille.

Discussion

L'objectif de cette revue de littérature était de déterminer dans quelle mesure le masseur-kinésithérapeute peut accompagner les coureurs à risque ou présentant une tendinopathie d'Achille en s'appuyant sur une adaptation des paramètres biomécaniques de la course.

Cette discussion portera sur l'interprétation des résultats obtenus à partir des études sélectionnées, en les mettant en perspective avec la pratique clinique en kinésithérapie. Elle abordera également les limites méthodologiques de ce travail ainsi que des pistes de réflexion d'amélioration en vue de futures recherches autour de cette thématique.

1. Synthèse des principaux résultats

L'ensemble des résultats obtenus ne permet pas d'établir un consensus clair concernant les paramètres biomécaniques associés à la tendinopathie d'Achille (TA) chez le coureur à pied.

Les études observationnelles, notamment la méta-analyse de *Sancho et al.* (46) ainsi que des études de *Skypala et al.* (47) et *Aubol et Milner* (53) rapportent peu de différences significatives entre les groupes sains et les groupes présentant une TA, bien que certaines variables cinématiques, notamment au niveau du genou et de la cheville, semblent associées au développement de la pathologie. Toutefois, ces résultats restent hétérogènes et ne permettent pas d'identifier un profil spécifique de coureur à risque de développer une TA.

En parallèle, les études expérimentales montrent que plusieurs paramètres biomécaniques influencent directement la charge appliquée au tendon d'Achille. En effet, l'augmentation de la vitesse de course ou encore l'adoption d'un pattern de course avant-pied (FFS) est associée à une augmentation des contraintes transmises au tendon d'Achille. (49,51,52) En revanche, une augmentation du temps de contact au sol ou de la cadence provoque une diminution de ces contraintes. (49,50)

Ainsi, il est important de faire une distinction entre les paramètres biomécaniques associés à la présence d'une TA et ceux influençant directement la charge mécanique appliquée au tendon. Par cette distinction, les résultats suggèrent que les facteurs observés chez les coureurs blessés ne correspondent pas nécessairement aux facteurs modifiables permettant d'agir sur les contraintes tendineuses en pratique clinique. Cette distinction constitue un élément central dans la compréhension et l'approche multifactorielle de la tendinopathie d'Achille et oriente directement la réflexion clinique en kinésithérapie.

2. Lien entre paramètres biomécaniques et charge tendineuse

Comme présenté dans le continuum de la tendinopathie de Cook et Purdam (5), la charge mécanique apparaît comme un élément central dans la compréhension de la tendinopathie d'Achille chez le coureur. Cette pathologie semble s'inscrire dans un modèle multifactoriel, ne permettant pas d'identifier un paramètre biomécanique isolé à l'origine de sa survenue.

Les altérations observées au niveau du genou ou de la cheville chez les coureurs présentant une TA semblent ainsi davantage constituer d'adaptations ou de conséquences de la pathologie plutôt que des facteurs causaux directs. Cette hypothèse renforce l'idée que la survenue d'une TA résulterait d'une interaction complexe entre les contraintes mécaniques, les capacités d'adaptation du tendon et l'exposition à la course et à la charge qu'elle implique.

C'est dans ce contexte que la notion de charge tendineuse s'inscrit comme un élément majeur pour la compréhension de ce travail. La survenue d'une TA pourrait ainsi résulter d'un déséquilibre entre la capacité du tendon à tolérer les contraintes et les sollicitations mécaniques imposées par la course, impliquant des notions de surcharge progressive.

Pour autant, l'analyse de cette charge mécanique ne peut se limiter aux forces mesurées au sol du fait de la complexité biomécanique de la course. Une distinction entre les contraintes externes (ex : forces de réaction au sol, impact...) et les contraintes internes (ex : étirement du tendon, tension musculaire...) doit être réalisée. À titre d'exemple, on peut s'appuyer sur l'étude de *Nishiguchi et al.* (52) qui montre qu'un pattern type FFS réduit les forces d'impact au sol (contraintes externes) mais augmente les contraintes internes appliquées au tendon (vitesse d'étirement, force dans le tendon).

3. Implications cliniques en kinésithérapie

3.1 Paramètres biomécaniques difficilement modifiables

Comme évoqué précédemment, les résultats de cette revue ne permettent pas d'établir un profil biomécanique spécifique pouvant identifier un coureur à risque. En effet, la méta-analyse de *Sancho et al.* (46), principalement orientée sur les paramètres cinématiques et cinétiques, ne met en évidence que peu de différences significatives pour les variables analysées, notamment au sujet de la dorsiflexion de cheville, de l'éversion ou encore des forces de réaction au sol. De la même manière, *Skypala et al.* (47) et *Aubol et Milner* (53) confirment le faible nombre de différences entre les coureurs sains et les coureurs présentant une TA. Les rares variables significatives identifiées, telles que l'augmentation de la flexion de genou au

contact initial et en phase d'appui (47) , la durée de la pronation et de l'éversion ou encore l'éversion en phase de propulsion (46), toutes issues de résultats isolés, s'avèrent insuffisantes pour la définition d'un profil à risque applicable dans une pratique clinique. C'est cette conclusion qui permet de suggérer que la biomécanique de course ne semble pas à elle seule expliquer l'apparition d'une tendinopathie d'Achille.

L'étude de certaines variables nous pousse également à nous interroger sur la facilité à agir sur certains paramètres biomécaniques. Les schémas moteurs de la course, comme toutes les habiletés motrices, sont influencés par un ensemble de paramètres multifactoriels notamment les expériences passées, les caractéristiques anatomiques, les antécédents, les propriétés des tissus ainsi que les stratégies neuromusculaires propres à chaque individu.

La modification de ces systèmes, construits sur des organisations complexes, implique des processus d'apprentissage moteur et comportementaux. Cet apprentissage semble être un processus long avec, en contrepartie, des effets sur la charge tendineuse qui sont incertains à l'image des résultats présentés ci-dessus. (46,47,53)

En s'appuyant sur ce point de vue, l'étude d'*Aubol et Milner* est particulièrement intéressante dans sa déconstruction des hypothèses en lien avec l'éversion du pied (whipping) ou avec la dorsiflexion et l'absorption des puissances excentriques à la cheville (tearing) (53). En effet, ces deux paramètres sont régulièrement décrits comme des facteurs de risque, or, les résultats suggèrent que ces variables ne constituent pas des cibles pertinentes en pratique clinique.

Une réflexion est également nécessaire dans ces études comparatives entre les coureurs sains et les coureurs présentant une TA sur l'origine de ces différences. Les altérations biomécaniques observées chez les coureurs avec une TA pourraient correspondre à des adaptations du système musculosquelettique plutôt qu'à une causalité directe, soulevant la question de la cause ou de la conséquence. L'augmentation de la flexion de genou chez les coureurs atteints de TA dans l'étude de *Skypala et al.*(47), identifiée comme un facteur prédictif pourrait refléter d'avantage d'une stratégie adaptative face à la charge subie ayant pour but de diminuer les contraintes sur la cheville et le tendon d'Achille. Dans la méta-analyse de *Sancho et al.*(46), on retrouve par ailleurs une différence significative chez des coureurs asymptomatiques mais avec des antécédents de TA soutenant l'hypothèse de la modification adaptative de certaines variables biomécaniques.

L'origine de ces adaptations pourrait être consciente ou inconsciente. Plusieurs facteurs pourraient entraîner un phénomène adaptatif, tels que la charge subie par le tendon, les douleurs ressenties par le coureur, la raideur, la performance ou encore les sensations perçues.

Ces éléments remettent en question une approche de la course à pied qui serait normée, et qui viserait à s'approcher d'un « modèle idéal » sans prendre en compte le coureur en tant que personne. Ici, nous soulevons plutôt l'importance de considérer l'existence de variabilités interindividuelles plutôt que de s'appuyer sur des modèles standardisés. Par ailleurs, ces éléments s'inscrivent dans une vision moderne des pathologies musculosquelettiques, dans laquelle la variabilité du mouvement est acceptée et normalisée.

Ainsi, le rôle du masseur-kinésithérapeute s'inscrit dans une démarche individualisée à chaque patient. La recherche d'un modèle unique n'apparaît pas comme une piste de traitement pertinente au regard de ces paramètres difficilement modifiables et peu soutenus de manière cohérente avec la littérature actuelle étudiée.

3.2 Paramètres biomécaniques modifiables

Les résultats obtenus à partir des études expérimentales incluses dans cette revue de littérature ont permis d'identifier plusieurs paramètres biomécaniques modifiables influençant directement la charge appliquée sur le tendon d'Achille ; la plupart étant des paramètres spatio-temporels. Contrairement aux résultats obtenus dans les études comparatives, montrant très peu de différences significatives et semblant difficiles à inclure dans une pratique kinésithérapique, ces paramètres biomécaniques présentent un intérêt évident en pratique clinique.

Cet intérêt repose sur deux éléments principaux :

- Les nombreux résultats significatifs avec des tailles d'effets large (ES)
- La capacité à modifier ces paramètres volontairement par le coureur ou par un encadrement par le kinésithérapeute.

En effet, dans nos études expérimentales, on observe que les sujets n'ont besoin que de peu d'entraînement, en général 4 ou 5 essais sont donnés pour modifier leur propre schéma de course. Une simple consigne orale (49,50), l'utilisation d'un métronome (49) ou encore une vitesse imposée sur tapis (51) semblent être suffisants pour l'initiation d'un changement biomécanique dans un schéma de course.

3.2.1 La vitesse de course

Parmi ces paramètres impactant directement la charge transmise au tendon d'Achille, la vitesse de course ressort comme un déterminant majeur. De manière évidente, *Starbuck et al.* (51) montre une augmentation significative de la force maximale, du taux de charge et de la charge cumulative appliquée au tendon d'Achille lorsque la vitesse de course augmente.

Cette gestion de la charge par la vitesse de course est intéressante en pratique clinique dans le sens où elle n'apparaît pas comme un paramètre binaire « présent/absent » ou « oui/non » mais vraiment comme une variable continue. La vitesse apparaît donc comme un curseur progressif sur lequel il est possible de se déplacer dans un sens ou l'autre en fonction des retours de nos patients et de l'expertise du kinésithérapeute, la rendant très pertinente dans la gestion et la prévention (qu'elle soit primaire ou secondaire) de notre public.

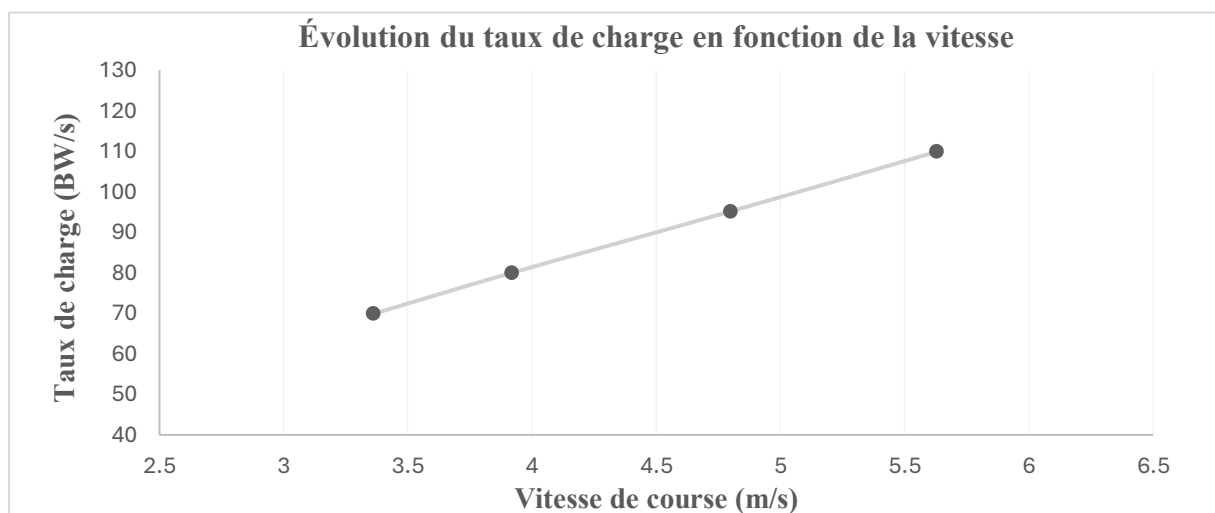


Figure 5 : Représentation du lien entre vitesse (m/s) et taux de charge (BW/s) (51)

Tous ces éléments mis bout à bout soulignent la place majeure de la vitesse dans la modulation de la charge tendineuse. Toutefois, il est important de garder en tête qu'une modification de ce paramètre ne peut se faire de manière isolée. En effet, *Starbuck et al.* (51) ont prouvé qu'une augmentation de la vitesse influençait d'autres paramètres biomécaniques tels qu'une augmentation de la cadence, une diminution du temps de contact au sol ou encore un déplacement antérieur du pattern d'attaque du pied.

Ainsi, la vitesse, qui apparaît comme un paramètre central au regard de notre problématique, s'inscrit dans un système global dans lequel les différentes variables biomécaniques interagissent entre elles.

3.2.2 Le pattern d'attaque du pied

Le pattern d'attaque du pied est probablement l'un des paramètres biomécaniques les plus fréquemment évoqué chez les coureurs et dans la littérature du fait de son influence sur les contraintes transmises aux membres inférieurs. Les résultats obtenus dans cette revue mettent en évidence des résultats contrastés de ce paramètre sur la charge tendineuse, notamment entre contraintes internes et externes. Cette notion souligne une certaine complexité et prudence dans l'interprétation des résultats.

Dans leur étude, *Lyght et al.* et *Nishiguchi et al.* (49,52) mettent en évidence que l'adoption d'un pattern d'attaque du pied plus antérieur, soit vers un pattern d'attaque FFS, est associée à une augmentation des contraintes internes appliquées au tendon d'Achille. En effet, on retrouve une augmentation de la force maximale, de l'impulsion, de la charge maximale et du taux de charge cumulé chez les coureurs qualifiés de FFS. Chez les coureurs avec un pattern RFS, on retrouve le mécanisme inverse avec une diminution des contraintes internes sur ces mêmes critères.

C'est dans ce contexte que l'analyse des résultats est importante car l'étude de *Nishiguchi et al.* (52) s'intéresse aussi aux contraintes externes, notamment sur des paramètres cinétiques tels que les forces d'impact et les taux de charge au sol. Alors que les patterns FFS semblent associés à une augmentation des contraintes internes sur le tendon d'Achille, on remarque également qu'ils sont associés à une diminution des contraintes externes. Le même schéma se retrouve pour les RFS qui eux montrent une augmentation de ces contraintes externes.

Ces résultats soulignent qu'aucun pattern ne peut être considéré comme optimal de manière universelle, mais plutôt qu'il existe des patterns préférentiels pour chaque coureur selon leurs caractéristiques.

En effet, à la lecture de ces résultats, il est évident de se demander : où sont transférés ces contraintes externes dans les différents patterns ? Au regard des conclusions établies sur le pattern FFS, l'hypothèse d'une absorption majeure des contraintes mécaniques par le complexe du triceps sural semble être la plus plausible. En revanche, nous pouvons nous interroger sur les sites de redistribution des contraintes externes vers d'autres localisations du membre inférieur chez le coureur adoptant un pattern RFS. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse qu'une diminution des contraintes internes transmises au tendon d'Achille est accompagnée

d'une augmentation des sollicitations d'autres articulations et/ou des systèmes musculosquelettiques.

Toutefois, les études observationnelles et comparatives incluses dans cette revue (46–48) ne mettent pas en évidence la surexposition d'un des patterns entre les coureurs sains et les coureurs présentant une TA. Ce constat renforce l'idée qu'un pattern d'attaque de pied ne peut pas être à lui seul systématiquement associé avec la survenue ou non d'une pathologie.

Ainsi, bien que le pattern d'attaque du pied montre des résultats significatifs au sujet de la charge tendineuse, son implication dans la survenue de la pathologie reste à nuancer. Cependant, les résultats obtenus sont une bonne piste pour le kinésithérapeute dans une approche de gestion de la charge et l'adaptation de la course chez les patients coureurs atteints de TA.

3.2.3 La cadence

Comme le pattern d'attaque du pied, la cadence est également un paramètre biomécanique souvent évoqué en pratique clinique. Sa facilité à être modifiée, notamment par des consignes externes, et son influence sur les contraintes appliquées aux membres inférieurs en font une variable intéressante à étudier.

L'étude de *Lyght et al.* (49) a identifié que l'augmentation d'une cadence (par rapport à la cadence préférentielle) entraîne une diminution du stress tendineux et de l'allongement du tendon. Ces résultats sont retrouvés indépendamment du pattern d'attaque du pied et suggèreraient qu'une gestion de la charge tendineuse pourrait passer par une modification/adaptation de cette cadence.

La cadence se présente donc comme un paramètre biomécanique modifiable pertinent dans la modulation de la charge, cependant, il est important de mesurer l'interprétation de ce paramètre et de l'intégrer dans une approche biomécanique globale.

3.2.4 Le temps de contact au sol

Le temps de contact au sol (TCS) apparaît également comme une variable biomécanique de la course à pied exerçant une influence directe sur les contraintes appliquées au membre inférieur. Comme le montre l'étude d'*Aubol et al.* (50), il a pour avantage d'être modifié facilement par des consignes externes.

En effet, les résultats de cette étude montrent qu'un TCS ayant tendance à augmenter a pour conséquence une diminution des charges appliquées au tendon d'Achille ; notamment du pic

de force et du taux de charge cumulatif subit (50). Inversement, une diminution du TCS est associée à une augmentation de ces contraintes. Ces résultats suggèrent que le TCS est un levier de gestion intéressant dans un but de modulation de la charge.

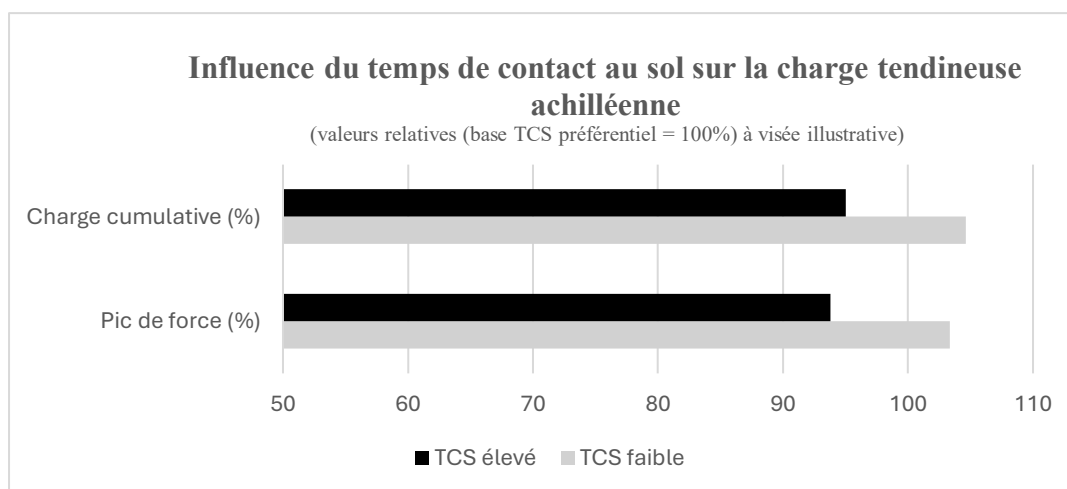


Figure 6 : Représentation des contraintes subies avec un TCS faible vs élevé (50)

Cette diminution des contraintes corrélée à l'augmentation du temps de contact au sol pousse à émettre l'hypothèse suivante : cette stratégie permettrait la répartition des contraintes sur une durée prolongée, réduisant par conséquent le taux de charge et le pic de force transmis au tendon d'Achille et augmentant l'« étalement » des forces sur la durée.

Il faut toutefois nuancer l'interprétation de ces résultats. En effet, une analyse isolée de ce paramètre permet une conclusion pertinente aux regards des différences significatives. Cependant, *Aubol et al.* montrent un lien étroit du TCS avec la cadence en condition libre et la vitesse de course, soulignant la difficulté d'isoler ce paramètre en pratique clinique.

De cette façon, le TCS s'illustre comme un paramètre modifiable avec un lien direct sur la charge tendineuse. Il faut cependant replacer son effet dans un système biomécanique global, construit d'interactions entre ces différents paramètres.

3.2.5 Interaction des paramètres biomécaniques : approche systémique

Comme évoqué dans les sous parties précédentes, les paramètres biomécaniques identifiés comme pertinents dans un but de gestion de la charge sur le tendon d'Achille ne peuvent être interprétés de manière isolée. En effet, les résultats des études expérimentales (49–52) mettent en évidence que la modification d'un paramètre entraîne nécessairement une adaptation d'autres variables.

À titre d'exemple, une augmentation de la vitesse de course a pour conséquence : une augmentation de la cadence, une diminution du TCS, une modification vers un pattern d'attaque du pied FFS (51). Ces interactions soulignent que la biomécanique de course s'installe dans un système dynamique, dans lequel les différents paramètres interagissent entre eux en permanence.

Dans ce contexte, il apparaît difficile d'attribuer les effets observés sur la charge tendineuse à un paramètre isolé. En effet, l'étude d'*Aubol et al.* (50) observe par exemple une augmentation de la cadence lors d'une diminution du temps de contact au sol ; alors est-ce le TCS ou la cadence (ou l'interaction des deux) qui impact la charge tendineuse ? Les modifications biomécaniques observées semblent s'inscrire dans un schéma de réorganisation globale.

Tableau 5 : Synthèse des différentes interactions entre les paramètres biomécaniques

Paramètre modifié	Adaptations biomécaniques associées	Effets mécaniques intermédiaires	Effet global sur la charge tendineuse
↑ Vitesse	↑ cadence ↓ TCS ↑ longueur de foulée Déviation vers un pattern FFS	↑ contraintes internes ↑ taux de charge ↓ temps d'absorption des forces	↑↑ Charge tendineuse
↑ Cadence	↓ longueur de foulée ↓ oscillation verticale ↓ TCS	↓ pic de contraintes tendineuse ↓ étirement du tendon	↓ Charge tendineuse
↑ TCS	↓ cadence ↑ durée d'appui	↓ taux de charge ↑ temps d'absorption des forces	↓ Charge tendineuse
Pattern RFS (attaque talon)	↓ sollicitation triceps sural ↑ flexion dorsale	↑ impact au sol (contraintes externes) ↓ contraintes tendineuses (contraintes internes)	↓ Charge tendineuse (↑ contraintes externes)
Pattern FFS (attaque avant pied)	↑ flexion plantaire ↑ sollicitation triceps sural ↑ vitesse d'étirement du tendon	↑ contraintes internes ↓ impact au sol (contraintes externes)	↑ Charge tendineuse (↓ contraintes externes)

↓ = diminution ↑ = augmentation

Cette absence de paramètre unique identifié permet de mieux comprendre les résultats peu concluants des études observationnelles citées plus tôt (46–48). En effet, si l'addition de plusieurs paramètres différents peut donner une même contrainte tendineuse chez des coureurs, il devient difficile d'obtenir un paramètre isolé à cibler en rééducation.

Cette approche globale met en avant la notion de variabilité interindividuelle. Par variabilité interindividuelle, on entend que chaque coureur développe son propre schéma de course défini par des caractéristiques anatomiques, des capacités neuromusculaires, des antécédents, des croyances et tout un ensemble de facteurs physio-pathologiques et sociaux-culturels. Ainsi, une même modification d'un paramètre biomécanique chez un coureur peut avoir des effets différents selon l'individu, par l'interaction de celui-ci avec tous les autres.

Par ailleurs, ces observations font ressortir un compromis biomécanique, c'est-à-dire que l'adaptation d'un paramètre dans un but de diminution de la charge tendineuse peut être accompagné d'une modification involontaire d'un autre paramètre qui lui aurait une tendance à augmenter d'autres sollicitations, traduisant une redistribution des contraintes mécaniques sur l'ensemble du système musculosquelettique. Cette vision souligne une nouvelle fois l'intérêt de ne pas avoir une approche centrée sur un paramètre isolé.

3.3 Implication clinique en kinésithérapie

Cette revue de littérature met en évidence qu'il existe des paramètres biomécaniques de la course à pied qui peuvent être modifiés dans un objectif de gestion de la charge. Cependant, leur utilisation en pratique clinique ne doit pas s'apparenter à une simple modification biomécanique. En effet, le masseur-kinésithérapeute utilisant la modification des paramètres doit l'intégrer dans une démarche globale et progressive de gestion de la charge du tendon d'Achille.

3.3.1 Des leviers accessibles en pratique clinique

Parmi tous les résultats obtenus précédemment, la vitesse de course semble être un des leviers les plus intéressants dans la modulation de cette charge pour plusieurs raisons.

Dans un premier temps, la vitesse est un paramètre facilement modifiable par de nombreux outils comme l'utilisation de : tapis de course, téléphone portable avec application de course à pied, montre GPS ou encore chronomètre. Tous ces outils permettent un feedback visuel rapide et simple pour le coureur souffrant de TA.

De plus, la vitesse peut s'ajuster de manière graduelle et permet donc une exposition progressive à la charge, permettant d'adapter ce paramètre à la symptomatologie et aux ressentis du patient. Ainsi, une diminution de la vitesse dans les sorties de nos patients pourrait être adaptée à une phase douloureuse ou une reprise de la course et une augmentation progressive s'inscrirait dans une logique de réadaptation à la charge. (51)

Au regard des résultats de cette revue et de l'aspect des variabilités interindividuelles qui en est ressorti, il n'est pas pertinent de donner une vitesse précise pour chaque phase mais plutôt de s'appuyer sur le ressenti du patient, plaçant la relation soignant/soigné au cœur de cette approche.

En revanche, il ne faut pas oublier que la vitesse ne se limite pas à une augmentation directe des contraintes. Celle-ci entraîne la modification des nombreux paramètres biomécaniques tendant tous individuellement vers une augmentation de la charge au tendon d'Achille. Cela souligne d'autant plus cette notion de progressivité à respecter autour de la vitesse du coureur.

La cadence apparaît également être un outil pertinent pour des raisons assez similaires : la facilité d'action sur celle-ci. En effet, les études qui s'intéressaient à ce paramètre (49,50) utilisaient seulement une consigne orale ou un métronome pour modifier ce schéma. Pour les coureurs utilisant des écouteurs lors de leur activité, il existe également des musiques avec des BPM spécialement conçues pour adapter sa cadence au rythme choisi. Toujours dans cette démarche de prise en compte des variabilités interindividuelles, aucun chiffre précis de cible n'est donné car la modification va dépendre de la cadence initiale. Cette cadence est mesurable par le kinésithérapeute lors d'une course en extérieur ou sur tapis de course avec un compteur. Globalement, les résultats montrent qu'une augmentation de 5% par rapport à la cadence initiale diminue les contraintes tendineuses, par une réduction de l'amplitude des contraintes appliquées.

Le temps de contact au sol s'est également montré comme un paramètre permettant de moduler la charge tendineuse. En effet, cet aspect d'« étalement des contraintes » obtenu par l'augmentation du TCS permet une diminution du pic de charge subi par le tendon d'Achille. Ce paramètre reste toutefois à nuancer car il semble être le moins évident à suivre et à comprendre pour le patient, du fait de l'absence de feedback. En effet, dans l'étude d'*Aubol et al.* (50), la simple consigne orale d'augmenter le TCS est efficace mais seules des conditions expérimentales permettent de le vérifier. En pratique clinique, il est plus compliqué pour le coureur et le kinésithérapeute d'évaluer si cette modification est bien appliquée. Le TCS reste tout de même une piste intéressante, mais plus compliquée d'accès.

Enfin, le pattern d'attaque du pied montre également une certaine facilité à être modifié seulement par des consignes orales. Cependant, plus que les autres, ce paramètre doit être abordé avec prudence. En effet, un pattern RFS semble diminuer les contraintes achilléennes, or il augmente les contraintes sur d'autres structures. (52) C'est pourquoi cette modification

n'est pas à exclure mais elle doit être réalisée à la suite d'une réflexion individualisée. Les antécédents de blessures du patient seront pleinement à explorer pour être sûr de ne pas solliciter une zone qui pourrait être plus fragile (en partant du principe qu'un antécédent de blessure constitue le facteur de risque principal). Il faudra aussi questionner les objectifs du patient, la modification du pattern d'attaque peut se présenter comme une solution à court terme pour garder un entraînement proche d'une période de compétition ou autre.

C'est pourquoi, la modification du pattern d'attaque du pied est loin d'être à intégrer de manière systématique mais peut s'avérer être une solution ponctuelle selon la réflexion clinique.

3.3.2 Hiérarchisation des paramètres biomécaniques

À l'image des arguments avancés dans l'ensemble de cette revue, tous les paramètres biomécaniques ne présentent pas le même intérêt en kinésithérapie. Les paramètres spatio-temporels tels que la cadence, la vitesse et le temps de contact au sol se montrent être les plus accessibles, modulables et pertinents pour agir sur la charge tendineuse.

Inversement, les paramètres cinématiques et cinétiques s'illustrant plutôt dans la recherche d'un modèle biomécanique idéal ne semblent pas justifiés en pratique clinique à l'issue des résultats obtenus dans cette revue de littérature.

L'ensemble de ces résultats s'éloignent d'une approche normative de la course à pied et explique la diversité des profils des coureurs, qu'ils soient récréatifs, compétitifs ou encore élités. Ainsi ressort l'intérêt du bilan, de l'échange, de l'observation et de l'analyse du masseur-kinésithérapeute.

3.3.3 Suivi et évaluation de la charge et des symptômes

L'adaptation de ces paramètres prend du sens si la prise en charge du coureur, et notamment de ses symptômes sont intégrés dans une démarche de suivi rigoureux. Plusieurs outils sont alors à disposition du masseur-kinésithérapeute notamment l'échange. En effet, de manière qualitative, l'entretien clinique permet d'avoir le ressenti du patient sur sa raideur matinale, la douleur lors de la course ou autres activités et la tolérance à cette douleur dans les heures qui suivent. L'entretien avec le patient permet aussi de juger de l'impact moral que la pathologie et ses conséquences ont sur lui.

De manière quantitative, des outils cliniques rapides tels que l'EVA ou l'EN peuvent être pertinents car ils offrent une évaluation intra-individuelle du patient et permettent des évaluations régulières.(54) Plus spécifiquement, le questionnaire VISA-A, utilisé pour évaluer

la sévérité d'une tendinopathie d'Achille peut être utilisé comme marqueur de suivi des symptômes dans le temps. (27)

Le suivi par l'utilisation de ces différents marqueurs permet au kinésithérapeute d'ajuster progressivement, à la hausse ou à la baisse, l'exposition à la charge par l'adaptation des paramètres biomécaniques (ou autres pistes thérapeutiques), tout en s'inscrivant dans une démarche individualisée et sécurisée.

3.3.4 Le rôle du masseur-kinésithérapeute, au-delà de la biomécanique

L'un des éléments majeurs mis en évidence par ce travail est que la biomécanique de course ne constitue qu'un des facteurs impliqués dans la survenue de la TA. La prise en charge de ces patients ne peut donc résider dans une approche purement technique.

Le rôle du masseur-kinésithérapeute va s'inscrire dans une démarche de gestion de la charge, c'est d'ailleurs pour cela que les études expérimentales sur des sujets sains ont toutes leur place dans cette revue. Cette gestion de la charge passe par une adaptation progressive de l'activité tout en prenant compte du patient au-delà de sa pathologie, soit : ses capacités, sa compréhension, ses objectifs, son caractère et sa symptomatologie. Dans ce contexte, le rôle d'éducation du patient de la part du masseur-kinésithérapeute trouve pleinement sa place, notamment sur des conseils comportementaux. Informer le patient sur l'hygiène de vie et les facteurs de risques, l'explication de la notion de charge progressive et des mécanismes de la pathologie ou encore la variabilité des schémas de course est une partie essentielle de la prise en charge kinésithérapique. (55)

Le kinésithérapeute ne se limite pas à corriger un geste autour d'une pathologie, mais agit comme un accompagnateur du mouvement et de la charge. Il prend en compte le patient dans une démarche bio-psycho-sociale en intégrant des dimensions biomécaniques, physiopathologiques et comportementales, au service d'un traitement individualisé et adapté. (56)

4. Limites et biais de la revue

Malgré ses forces, cette revue présente plusieurs limites méthodologiques et biais qu'il convient de prendre en compte dans l'interprétation des résultats. Certaines notions, comme l'aspect systémique mis en avant relèvent d'une interprétation personnelle des résultats, pas toujours formulée explicitement dans les études incluses. Il est important de prendre en compte le biais de publication inhérent aux attentes autour de cette revue.

Premièrement, l'hétérogénéité des études incluses est source d'une limite majeure. En effet, les protocoles expérimentaux, les populations étudiées, les méthodes de mesures et les critères de jugement primaire diffèrent entre les études, rendant les comparaisons difficiles et diminuant la validité externe globale et créant un biais de sélection.

On retrouve également une hétérogénéité dans les critères diagnostiques de la tendinopathie d'Achille. En effet, certaines études s'appuient sur des auto-questionnaires, d'autres sur des critères cliniques et d'autres prennent en compte les antécédents, rendant l'extrapolation à la population générale des coureurs souffrant de tendinopathie d'Achille plus délicate. Ce point est à l'origine d'un biais de classification erronée.

Deuxièmement, une partie des études incluses dans cette revue sont expérimentales et s'intéressent à des paramètres biomécaniques certes, mais sur les tendons d'Achille de sujets sains. Bien que ces études soient très importantes pour la compréhension des mécanismes de charge tendineuse, l'extrapolation de leurs résultats à des coureurs pathologiques présente une limite. Il est également notable que les conditions expérimentales sont différentes des conditions réelles de course, entraînant une limite à la validité externe par un biais écologique. (47,49,50,52)

Troisièmement, les études observationnelles incluses présentent souvent des effectifs limités, avec des populations différentes et des résultats hétérogènes. Bien qu'une méta-analyse soit intégrée à la revue, la majorité des résultats repose sur des études expérimentales et observationnelles, limitant l'accès à une synthèse quantitative robuste. De plus, cette méta-analyse présente également des limites méthodologiques liées aux études qu'elle inclut. (46–48)

De plus, la majorité des études s'intéresse à un nombre de paramètres biomécaniques réduit, adoptant une approche plus analytique et isolée plutôt que globale, ce qui peut limiter la compréhension des interactions complexes entre les paramètres.

Enfin, cette revue de littérature présente également des limites en lien avec sa méthodologie, notamment l'absence d'analyse quantitative en lien avec la présence d'une seule méta-analyse. Un risque de biais de sélection des études est également présent. Par ailleurs, cette revue est également rédigée par une seule personne, incluant un biais de subjectivité qui ne peut être exclu.

5. Points forts de la revue

Toutefois, cette étude présente plusieurs atouts méthodologiques et scientifiques qui renforcent la pertinence et la fiabilité de nos résultats.

Tout d'abord, le choix d'inclure à la fois des études s'intéressant aux paramètres biomécaniques associés à la tendinopathie d'Achille mais également des études visant directement la charge tendineuse est un choix fort et original. Cette distinction a permis d'appréhender d'une manière plus précise les mécanismes impliqués dans la gestion des coureurs souffrant de TA et renforce, par ailleurs, la pertinence clinique de ce travail.

De plus, la présence d'études à la fois observationnelles et expérimentales offre une vision globale plus large sur notre problématique et limite un parti pris méthodologique. Avec cette approche, on observe un mélange des données cliniques et des mécanismes purement biomécaniques.

L'intégration des études expérimentales montre aussi un intérêt majeur, car les résultats obtenus sont tous issus d'analyses intra-sujets, ce qui limite grandement le biais d'échantillonnage et renforce la validité interne des résultats significatifs.

Cette revue se distingue également par son aspect systémique de la course à pied. En s'éloignant d'un paramètre isolé, elle propose une vision plus réaliste de la course à pied.

Enfin, l'interprétation de ces résultats met en évidence une vraie pertinence pour une application directe en pratique clinique. Cette revue identifie des leviers d'action concrets pour gérer le coureur souffrant de tendinopathie d'Achille tout en les replaçant dans une démarche individualisée. Cette pertinence clinique renforce l'intérêt de ce travail dans la pratique professionnelle de la kinésithérapie.

6. Perspective de recherche et implication clinique

Au-delà des résultats obtenus sur l'implication des paramètres biomécaniques dans la survenue d'une tendinopathie d'Achille, ce travail pousse à l'interrogation sur l'ensemble des facteurs influençant la charge tendineuse chez le coureur.

En effet, même si la biomécanique constitue un axe intéressant dans la prise en charge de nos patients, elle est loin d'être la seule piste de modulation de la charge. On sait que la survenue des blessures sportives est aujourd'hui décrite comme un déséquilibre entre la charge appliquée et les capacités d'adaptation, soulignant le rôle central de la planification d'entraînement. (57)

Parmi ces éléments susceptibles de moduler les capacités d'adaptation, les facteurs contextuels apparaissent comme une piste d'intérêt croissante. La fatigue, le stress, la qualité du sommeil, les maladies occurrentes, l'hygiène de vie ou encore les événements de vie pourraient moduler la capacité d'adaptation du tendon par une réponse tissulaire dégradée. (58,59) Dans cette perspective, deux coureurs soumis à une charge comparable pourraient présenter des réponses différentes. Ces variations interindividuelles pourraient s'expliquer par des différences d'état général, la récupération ou l'hygiène de vie associée. Ces éléments s'inscrivent dans une vision contemporaine et multifactorielle des troubles musculosquelettiques, en s'appuyant notamment sur le modèle bio-psycho-social.

Cette réflexion est source de plusieurs pistes de recherche qui pourraient être envisagées pour développer cette notion. Le développement d'outils d'évaluation, tels que des questionnaires visant à quantifier l'impact de ces facteurs contextuels chez le sportif, pourrait permettre de mieux les intégrer dans une prise en charge ou un programme d'entraînement. Une étude de terrain pourrait également être pertinente pour interroger les masseur-kinésithérapeutes sur leur posture pour interroger ces facteurs contextuels, et également comment ils les prennent en compte que ce soit dans le bilan ou dans leur prise en charge.

Cette réflexion dépasse le cadre spécifique de la TA et s'inscrit dans une démarche plus large de santé publique. Dans une population où la pratique de la course à pied ne cesse de croître et que les bénéfices pour la santé sont largement promus, il est important que le masseur-kinésithérapeute apparaisse avec une démarche d'accompagnement durable de ses patients. Cette démarche inclue par conséquent de l'éducation, un repérage attentif des facteurs de risque ou de vulnérabilité et une capacité à réorienter vers d'autres professionnels de santé lorsque cela est nécessaire. (55)

Ainsi, l'exploration future des interactions entre paramètres biomécaniques, charge d'entraînement, facteurs environnementaux et facteurs contextuels apparaît comme une piste prometteuse pour enrichir la compréhension, la prévention et la prise en charge des blessures tout en restant dans un modèle global et individualisé.

Conclusion et réponse à la problématique

Cette revue de littérature avait pour objectif d'identifier les paramètres biomécaniques de la course à pied pouvant influencer la tendinopathie d'Achille chez les coureurs et d'évaluer dans quelle mesure ces paramètres peuvent constituer des leviers d'actions dans la pratique clinique de la masso-kinésithérapie. Les résultats obtenus ne permettent pas d'établir un profil biomécanique spécifique et reproductible associé à la tendinopathie d'Achille. En effet, les études observationnelles analysées rapportent peu de différences significatives entre les coureurs sains et les coureurs atteints de tendinopathie d'Achille, et les résultats restent globalement hétérogènes. En revanche, les études expérimentales mettent en évidence que certains paramètres biomécaniques modifiables influencent directement la charge appliquée au tendon d'Achille ; tels que la vitesse de course, la cadence, le pattern d'attaque du pied ou encore le temps de contact au sol.

Ces résultats soulignent l'importance de distinguer les paramètres biomécaniques associés à la pathologie et ceux pouvant être utilisés comme des outils en pratique clinique. En effet, comme rappelé ci-dessus, les caractéristiques observées chez les coureurs avec une TA ne sont pas nécessairement des cibles pertinentes de modification. Cette distinction constitue l'élément principal de ce travail pour la compréhension de la pathologie ainsi que l'orientation de la prise en charge.

En s'inscrivant dans une approche contemporaine, la tendinopathie d'Achille apparaît comme une pathologie multifactorielle dans laquelle la charge mécanique (ou charge tendineuse) joue un rôle central en interaction avec des capacités d'adaptation et des facteurs individuels. C'est dans ce contexte que le rôle du masseur-kinésithérapeute ne se limite pas à la correction d'un schéma biomécanique (supposément pathologique) mais repose sur une gestion individualisée de cette charge mécanique et du patient. Ainsi, certains paramètres biomécaniques (cités ci-dessus) constituent des leviers d'actions intéressants dans cette gestion individualisée. Leur utilisation doit se faire dans une démarche globale en prenant en compte le patient, son niveau de pratique ou encore ses objectifs.

Enfin, si notre étude apporte des éléments solides en termes d'adaptations biomécaniques de la course à pied dans la gestion des coureurs atteints de tendinopathie d'Achille, elle comporte aussi plusieurs limites. Le nombre de participants reste limité, l'absence de protocole standardisé, les conditions non écologiques ainsi que l'hétérogénéité des critères diagnostiques montrent qu'il est encore possible d'affiner la validité de ces résultats.

En conclusion, la biomécanique de course constitue un outil pertinent dans la pratique clinique à condition de ne pas l'aborder comme un modèle normatif à corriger mais comme un schéma modulable au service d'une prise en charge individualisée et adaptée au coureur.

Bibliographie

1. Activité physique [Internet]. [cité 21 avr 2026]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>
2. L'activité physique et sportive : un atout essentiel pour le bien-être [Internet]. [cité 21 avr 2026]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/marne/assure/sante/themes/activite-physique-sante/sport-et-activite-physique-un-atout-pour-le-bien-etre>
3. Un-an-de-politiques-de-jeunesse-2023.pdf [Internet]. [cité 21 avr 2026]. Disponible sur: <https://injep.fr/wp-content/uploads/2024/04/Un-an-de-politiques-de-jeunesse-2023.pdf>
4. Lee KKW, Ling SKK, Yung PSH. Controlled trial to compare the Achilles tendon load during running in flatfoot participants using a customized arch support orthoses vs an orthotic heel lift. *BMC Musculoskelet Disord*. 13 nov 2019;20(1):535. doi:10.1186/s12891-019-2898-0
5. Cook JL, Purdam CR. Is tendon pathology a continuum? A pathology model to explain the clinical presentation of load-induced tendinopathy. *Br J Sports Med*. juin 2009;43(6):409-16. doi:10.1136/bjsm.2008.051193 PubMed PMID: 18812414.
6. Doral MN, Alam M, Bozkurt M, Turhan E, Atay OA, Dönmez G, et al. Functional anatomy of the Achilles tendon. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2010;18(5):98. doi:10.1007/s00167-010-1083-7
7. O'Brien M. The Anatomy of the Achilles Tendon. *Foot Ankle Clin*. 1 juin 2005;Achilles Tendon10(2):225-38. doi:10.1016/j.fcl.2005.01.011
8. Winnicki K, Ochała-Kłos A, Rutowicz B, Pękala PA, Tomaszewski KA. Functional anatomy, histology and biomechanics of the human Achilles tendon — A comprehensive review. *Ann Anat - Anat Anz*. 1 mai 2020;229:151461. doi:10.1016/j.aanat.2020.151461
9. Fang Y, Zhu D, Wei J, Qian L, Qiu R, Jia T, et al. Collagen denaturation in post-run Achilles tendons and Achilles tendinopathy: In vivo mechanophysiology and magnetic resonance imaging. *Sci Adv*. 10(40):eado2015. doi:10.1126/sciadv.ado2015 PubMed PMID: 39356750; PubMed Central PMCID: PMC11446262.
10. Cardoso TB, Pizzari T, Kinsella R, Hope D, Cook JL. Current trends in tendinopathy management. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. févr 2019;33(1):122-40. doi:10.1016/j.berh.2019.02.001 PubMed PMID: 31431267.
11. McAuliffe S, Tabuena A, McCreesh K, O'Keeffe M, Hurley J, Comyns T, et al. Altered Strength Profile in Achilles Tendinopathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Athl Train*. août 2019;54(8):889-900. doi:10.4085/1062-6050-43-18 PubMed PMID: 31386582; PubMed Central PMCID: PMC6761911.
12. Fares MY, Khachfe HH, Salhab HA, Zbib J, Fares Y, Fares J. Achilles tendinopathy: Exploring injury characteristics and current treatment modalities. *Foot Edinb Scotl*. mars 2021;46:101715. doi:10.1016/j.foot.2020.101715 PubMed PMID: 33039245.
13. Cook JL, Rio E, Purdam CR, Docking SI. Revisiting the continuum model of tendon pathology: what is its merit in clinical practice and research? *Br J Sports Med*. oct 2016;50(19):1187-91. doi:10.1136/bjsports-2015-095422 PubMed PMID: 27127294; PubMed Central PMCID: PMC5118437.

14. van Sterkenburg MN, van Dijk CN. Mid-portion Achilles tendinopathy: why painful? An evidence-based philosophy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(8):1226. doi:10.1007/s00167-011-1535-8
15. Chen W, Cloosterman KLA, Bierma-Zeinstra SMA, van Middelkoop M, de Vos RJ. Epidemiology of insertional and midportion Achilles tendinopathy in runners: A prospective cohort study. *J Sport Health Sci.* 1 mars 2024;13(2):256-63. doi:10.1016/j.jshs.2023.03.007
16. Pearce CJ, Tan A. Non-insertional Achilles tendinopathy. *EFORT Open Rev.* 22 nov 2016;1(11):383-90. doi:10.1302/2058-5241.1.160024 PubMed PMID: 28461917; PubMed Central PMCID: PMC5367540.
17. Stenerson LR, Melton BF, Bland HW, Ryan GA. Running-Related Overuse Injuries and Their Relationship with Run and Resistance Training Characteristics in Adult Recreational Runners: A Cross-Sectional Study. *J Funct Morphol Kinesiol.* 5 sept 2023;8(3):128. doi:10.3390/jfmk8030128
18. van der Vlist AC, Breda SJ, Oei EHG, Verhaar JAN, de Vos RJ. Clinical risk factors for Achilles tendinopathy: a systematic review. *Br J Sports Med.* nov 2019;53(21):1352-61. doi:10.1136/bjsports-2018-099991 PubMed PMID: 30718234; PubMed Central PMCID: PMC6837257.
19. Wang Y, Zhou H, Nie Z, Cui S. Prevalence of Achilles tendinopathy in physical exercise: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med Health Sci.* sept 2022;4(3):152-9. doi:10.1016/j.smhs.2022.03.003 PubMed PMID: 36090915; PubMed Central PMCID: PMC9453689.
20. Maffulli N, Kenward MG, Testa V, Capasso G, Regine R, King JB. Clinical diagnosis of Achilles tendinopathy with tendinosis. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med.* janv 2003;13(1):11-5. doi:10.1097/00042752-200301000-00003 PubMed PMID: 12544158.
21. van der Vlist AC, Winters M, Weir A, Ardern CL, Welton NJ, Caldwell DM, et al. Which treatment is most effective for patients with Achilles tendinopathy? A living systematic review with network meta-analysis of 29 randomised controlled trials. *Br J Sports Med.* mars 2021;55(5):249-56. doi:10.1136/bjsports-2019-101872 PubMed PMID: 32522732; PubMed Central PMCID: PMC7907558.
22. Dubois B, Berg F, Berg A. *La clinique du coureur: la santé par la course à pied.* Angoulême: Éditions Mons; 2019.
23. Lohrer H, David S, Nauck T. Surgical treatment for achilles tendinopathy - a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 10 mai 2016;17:207. doi:10.1186/s12891-016-1061-4 PubMed PMID: 27165287; PubMed Central PMCID: PMC4862213.
24. Manuels MSD pour le grand public [Internet]. [cité 9 nov 2025]. Enthésopathie du tendon d'Achille - Troubles osseux, articulaires et musculaires. Disponible sur: <https://www.msdmanuals.com/fr/accueil/troubles-osseux-articulaires-et-musculaires/problèmes-de-pied-et-de-cheville/enthésopathie-du-tendon-d-achille>
25. Purnell J, Johnson AH, Cody EA. Outcomes of Isolated Open Gastrocnemius Recession for the Treatment of Chronic Insertional Achilles Tendinopathy: A Retrospective Cohort Study. *Foot Ankle Int.* 1 nov 2023;44(11):1105-11. doi:10.1177/10711007231198508
26. Chimenti RL, Cychosz CC, Hall MM, Phisitkul P. Current Concepts Review Update: Insertional Achilles Tendinopathy. *Foot Ankle Int.* oct 2017;38(10):1160-9. doi:10.1177/1071100717723127 PubMed PMID: 28789557; PubMed Central PMCID: PMC5956523.

27. Iversen JV, Bartels EM, Langberg H. The victorian institute of sports assessment – achilles questionnaire (VISA-A) – a reliable tool for measuring achilles tendinopathy. *Int J Sports Phys Ther.* févr 2012;7(1):76-84. PubMed PMID: 22319681; PubMed Central PMCID: PMC3273883.
28. Malliaras P, Gravare Silbernagel K, de Vos RJ, Bourke J, Sancho I, Hanlon SL, et al. Diagnostic domains, differential diagnosis and conditions requiring further medical attention that are considered important in the assessment for Achilles tendinopathy: a Delphi consensus study. *Br J Sports Med.* 18 juin 2025;59(13):891-901. doi:10.1136/bjsports-2024-109185 PubMed PMID: 40240126.
29. Puleo J, Milroy P, Bain R. Anatomie de la course à pied. 2e éd. Louvain-la-Neuve (Belgique): De Boeck supérieur; 2020.
30. Dugan SA, Bhat KP. Biomechanics and Analysis of Running Gait. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 1 août 2005;Running Injuries16(3):603-21. doi:10.1016/j.pmr.2005.02.007
31. Willwacher S, Kurz M, Robbin J, Thelen M, Hamill J, Kelly L, et al. Running-Related Biomechanical Risk Factors for Overuse Injuries in Distance Runners: A Systematic Review Considering Injury Specificity and the Potentials for Future Research. *Sports Med Auckl Nz.* 2022;52(8):1863-77. doi:10.1007/s40279-022-01666-3 PubMed PMID: 35247202; PubMed Central PMCID: PMC9325808.
32. Heiderscheit BC, Chumanov ES, Michalski MP, Wille CM, Ryan MB. Effects of Step Rate Manipulation on Joint Mechanics during Running. *Med Sci Sports Exerc.* févr 2011;43(2):296-302. doi:10.1249/MSS.0b013e3181ebdf4 PubMed PMID: 20581720; PubMed Central PMCID: PMC3022995.
33. Runner's World [Internet]. 2025 [cité 19 nov 2025]. Experts Say Cadence Is Crucial to Running Performance. Here's Why You're Getting It Wrong. Disponible sur: <https://www.runnersworld.com/training/a64422354/why-cadence-matters-for-running/>
34. JOUBERT DP, GUERRA NA, JONES EJ, KNOWLES EG, PIPER AD. Ground Contact Time Imbalances Strongly Related to Impaired Running Economy. *Int J Exerc Sci.* 1 mai 2020;13(4):427-37. doi:10.70252/DBRF4451 PubMed PMID: 32509121; PubMed Central PMCID: PMC7241633.
35. Dugan SA, Bhat KP. Biomechanics and Analysis of Running Gait. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 1 août 2005;Running Injuries16(3):603-21. doi:10.1016/j.pmr.2005.02.007
36. Hung Au IP, Ng L, Davey P, So M, Chan B, Li P, et al. Impact Sound Across Rearfoot, Midfoot, and Forefoot Strike During Overground Running. *J Athl Train.* déc 2021;56(12):1362-6. doi:10.4085/1062-6050-0708.20 PubMed PMID: 34911076; PubMed Central PMCID: PMC8675315.
37. Riley PO, Dicharry J, Franz J, Della Croce U, Wilder RP, Kerrigan DC. A kinematics and kinetic comparison of overground and treadmill running. *Med Sci Sports Exerc.* juin 2008;40(6):1093-100. doi:10.1249/MSS.0b013e3181677530 PubMed PMID: 18460996.
38. Lee DC, Brellenthin AG, Thompson PD, Sui X, Lee IM, Lavie CJ. Running as a Key Lifestyle Medicine for Longevity. *Prog Cardiovasc Dis.* 2017;60(1):45-55. doi:10.1016/j.pcad.2017.03.005 PubMed PMID: 28365296.
39. Hespanhol Junior LC, Pillay JD, van Mechelen W, Verhagen E. Meta-Analyses of the Effects of Habitual Running on Indices of Health in Physically Inactive Adults. *Sports Med Auckl NZ.* oct 2015;45(10):1455-68. doi:10.1007/s40279-015-0359-y PubMed PMID: 26178328; PubMed Central PMCID: PMC4579257.

40. Oswald F, Campbell J, Williamson C, Richards J, Kelly P. A Scoping Review of the Relationship between Running and Mental Health. *Int J Environ Res Public Health*. 1 nov 2020;17(21):8059. doi:10.3390/ijerph17218059 PubMed PMID: 33139666; PubMed Central PMCID: PMC7663387.
41. The Proportion of Lower Limb Running Injuries by Gender, Anatomical Location and Specific Pathology: A Systematic Review - PubMed [Internet]. [cité 24 nov 2025]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30787648/>
42. Pallot A. Evidence based practice en rééducation: démarche pour une pratique raisonnée. 2e éd. [enrichie]. Issy-les-Moulineaux: Elsevier-Masson; 2025.
43. Richardson WS, Wilson MC, Nishikawa J, Hayward RS. The well-built clinical question: a key to evidence-based decisions. *ACP J Club*. 1995;123(3):A12-13. PubMed PMID: 7582737.
44. Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *J Epidemiol Community Health*. juin 1998;52(6):377-84. doi:10.1136/jech.52.6.377 PubMed PMID: 9764259; PubMed Central PMCID: PMC1756728.
45. Pallot A, Rostagno S. AMSTAR-2 : traduction française de l'échelle de qualité méthodologique pour les revues de littérature systématiques. *Kinésithérapie Rev*. 1 juill 2021;Évaluer en langue française la qualité méthodologiques des rapports de recherche21(235):13-4. doi:10.1016/j.kine.2019.12.050
46. Sancho I, Malliaras P, Barton C, Willy RW, Morrissey D. Biomechanical alterations in individuals with Achilles tendinopathy during running and hopping: A systematic review with meta-analysis. *Gait Posture*. sept 2019;73:189-201. doi:10.1016/j.gaitpost.2019.07.121 PubMed PMID: 31351358.
47. Skypala J, Hamill J, Sebera M, Elavsky S, Monte A, Jandacka D. Running-Related Achilles Tendon Injury: A Prospective Biomechanical Study in Recreational Runners. *J Appl Biomech*. 1 août 2023;39(4):237-45. doi:10.1123/jab.2022-0221 PubMed PMID: 37419494.
48. Aubol KG, Milner CE. Whipping or tearing? The biomechanics of Achilles tendinopathy in rearfoot strike runners. *The Foot*. 1 juin 2024;59:102082. doi:10.1016/j.foot.2024.102082
49. Lyght M, Nockerts M, Kernozek TW, Ragan R. Effects of Foot Strike and Step Frequency on Achilles Tendon Stress During Running. *J Appl Biomech*. août 2016;32(4):365-72. doi:10.1123/jab.2015-0183 PubMed PMID: 26955843.
50. Aubol KG, Silbernagel KG, Baxter JR, Shewokis PA, Milner CE. Increasing ground contact time reduces Achilles tendon forces during rearfoot strike running outdoors. *J Sci Med Sport*. août 2025;S1440244025004037. doi:10.1016/j.jsams.2025.08.009
51. Starbuck C, Bramah C, Herrington L, Jones R. The effect of speed on Achilles tendon forces and patellofemoral joint stresses in high-performing endurance runners. *Scand J Med Sci Sports*. août 2021;31(8):1657-65. doi:10.1111/sms.13972 PubMed PMID: 33864288.
52. Nishiguchi H, Takabayashi T, Kikumoto T, Kubo M. Effects of Foot-Strike Patterns During Running on Cumulative Load of Achilles Tendon Force, Plantar Fascia Force, and Patellofemoral Joint Stress. *J Sports Sci Med*. déc 2025;24(4):747-54. doi:10.52082/jssm.2025.747 PubMed PMID: 41210096; PubMed Central PMCID: PMC12590200.
53. Aubol KG, Milner CE. Whipping or tearing? The biomechanics of Achilles tendinopathy in rearfoot strike runners. *Foot Edinb Scotl*. juin 2024;59:102082. doi:10.1016/j.foot.2024.102082 PubMed PMID: 38574632.

54. Béraud BL, Nicolo P, Bruyneel AV. Mesure de l'intensité de la douleur par l'échelle visuelle analogique. *Kinésithérapie Rev.* 1 oct 2023;23(262):50-4. doi:10.1016/j.kine.2023.07.001
55. Chapitre Ier : Masseur-kinésithérapeute. (Articles L4321-1 à L4321-22) - Légifrance [Internet]. [cité 15 avr 2026]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006171311/
56. Piano V, Bioy A, Conradi S, Barfety-Servignat V, Mick G, Poisbeau P. Du modèle biopsychosocial à la démarche intégrative. *Douleur Analgésie.* 28 avr 2025;38(1):3-18. doi:10.1684/dea.2025.0316
57. Gabbett TJ. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med.* mars 2016;50(5):273-80. doi:10.1136/bjsports-2015-095788 PubMed PMID: 26758673; PubMed Central PMCID: PMC4789704.
58. Wadey R, Podlog L, Galli N, Mellalieu SD. Stress-related growth following sport injury: Examining the applicability of the organismic valuing theory. *Scand J Med Sci Sports.* oct 2016;26(10):1132-9. doi:10.1111/sms.12579 PubMed PMID: 26589377.
59. Gao B, Dwivedi S, Milewski MD, Cruz AI. Chronic lack of sleep is associated with increased sports injury in adolescents: a systematic review and meta-analysis. *Orthop J Sports Med.* 29 mars 2019;7(3 Suppl):2325967119S00132. doi:10.1177/2325967119S00132 PubMed PMID: null; PubMed Central PMCID: PMC6446394.

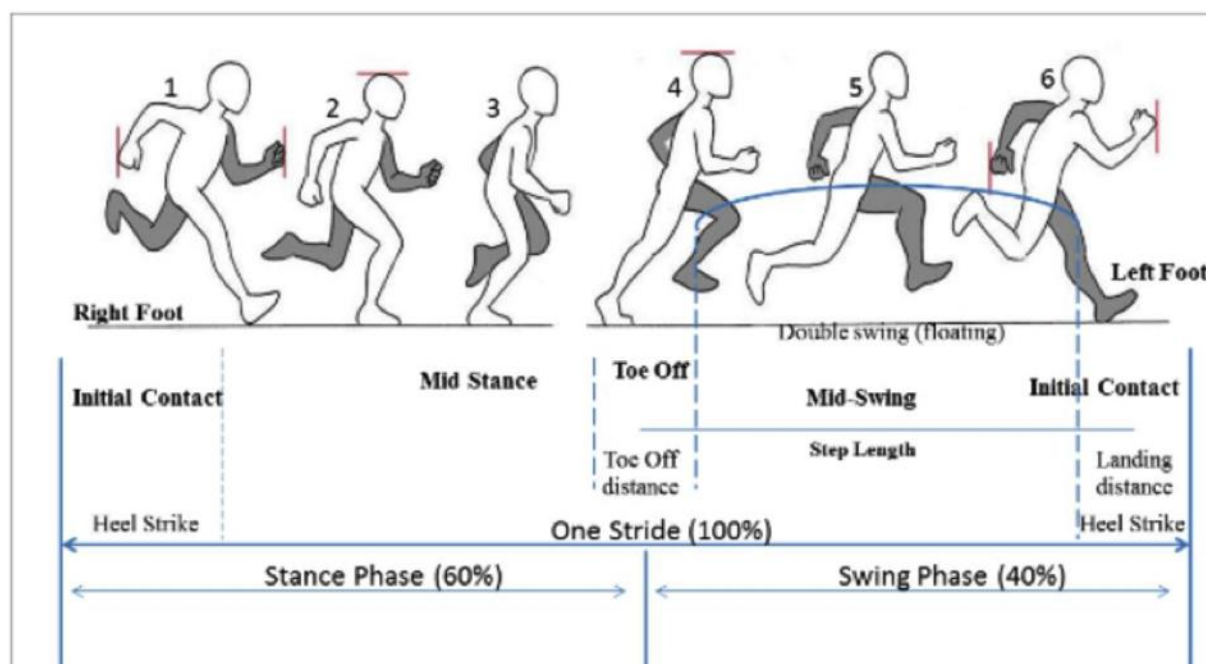
Table des illustrations

Figure 1 : Schéma de la composition histologique d'un tendon en coupe transversale (1)	7
Figure 2 : Schéma de la relation contrainte-étirement dans le tendon d'Achille (1)	8
Figure 3: Pathology Continuum of Cook and Purdam, BJSM – 2009 (8)	10
Figure 4 : Cook and Purdam continuum, BJSM – 2016 (9).....	10
Figure 5 : Représentation du lien entre vitesse (m/s) et taux de charge (BW/s) (48)	47
Figure 6 : Représentation des contraintes subies avec un TCS faible vs élevé (47)	50
Tableau 1 : Outil PICOS appliqué à la question de recherche	24
Tableau 2 : Synthèse des mots-clés	25
Tableau 3 : récapitulatif des stratégies de recherche	27
Tableau 4 : Synthèse des qualités méthodologiques des études incluses	31
Tableau 5 : Synthèse des différentes interactions entre les paramètres biomécaniques	51

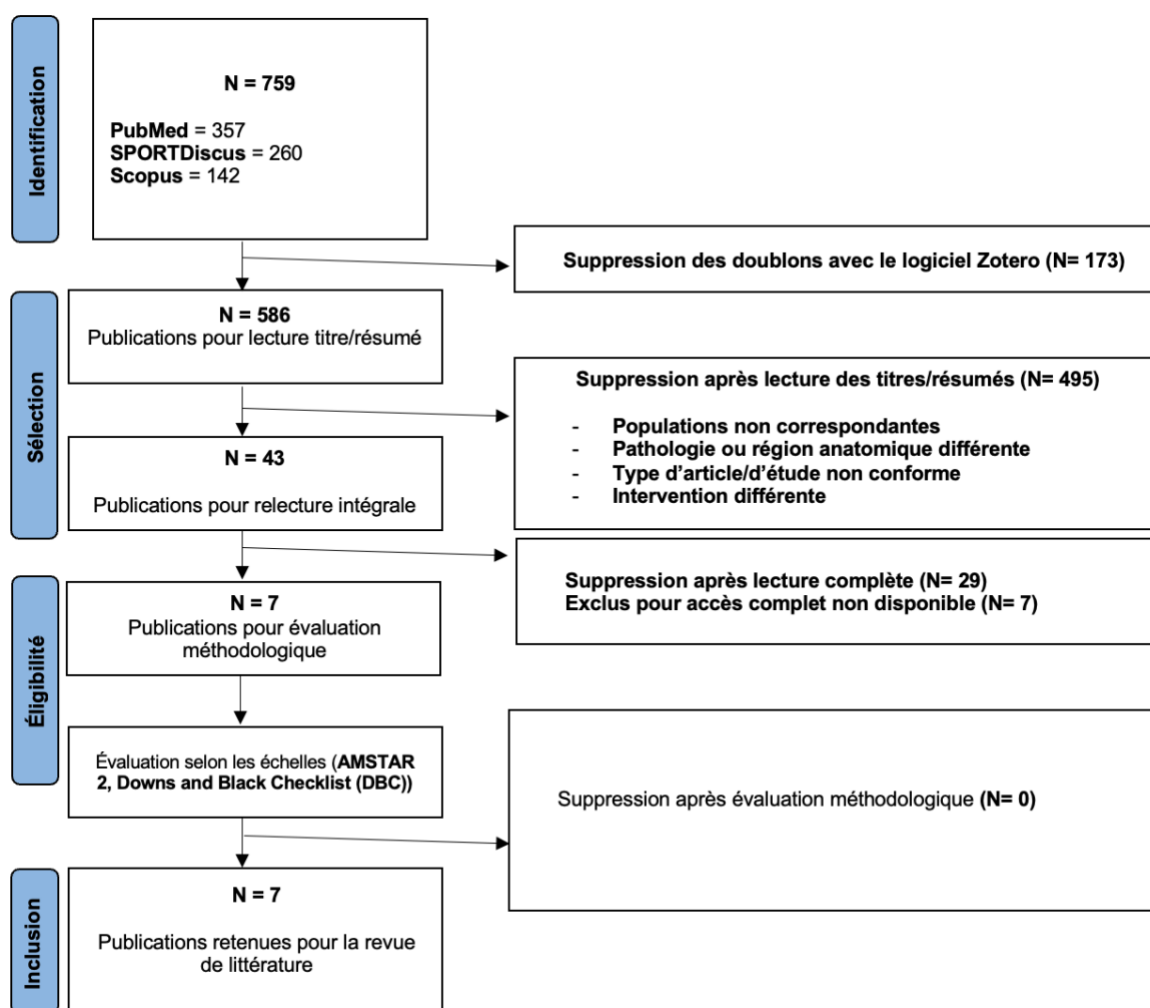
Table des annexes

ANNEXE A : Schéma du cycle de la course à pied	I
ANNEXE B : Diagramme de flux.....	II
ANNEXE C : Échelle de qualité méthodologique « Downs and Black ».....	III
.....	IV
ANNEXE D : Échelle de qualité méthodologique AMSTAR 2.....	V
ANNEXE E : Tableau récapitulatif de l'étude de <i>Sancho et al.</i>	VI
ANNEXE F : Tableau récapitulatif de l'étude d' <i>Aubol et Milner.</i>	VII
ANNEXE G : Tableau récapitulatif de l'étude de <i>Nishiguchi et al.</i>	VIII
ANNEXE H : Tableau récapitulatif de l'étude de <i>Starbuck et al.</i>	IX
ANNEXE I : Tableau récapitulatif de l'étude d' <i>Aubol et al.</i>	X
ANNEXE J : Tableau récapitulatif de l'étude de <i>Lyght et al.</i>	XI
ANNEXE K : Tableau récapitulatif de l'étude de <i>Skypala et al.</i>	XII
ANNEXE L : Synthèse des scores « Downs and Black » des études par items	XIII
ANNEXE M: Synthèse du score AMSTAR 2 pour la méta-analyse de <i>Sancho et al.</i>	XIV

ANNEXE A : Schéma du cycle de la course à pied



ANNEXE B : Diagramme de flux



ANNEXE C : Échelle de qualité méthodologique « Downs and Black »

Reporting		Yes (1)	No (0)	N/A (/)	Unable to determine (0)
1.	Is the hypothesis/aim/objective of the study clearly described?				
2.	Are the main outcomes to be measured clearly described in the Introduction or Methods section? <i>If the main outcomes are first mentioned in the results section, the question should be answered as no.</i>				
3.	Are the characteristics of the subjects included in the study clearly described? <i>In cohort studies and trials, inclusion and/or exclusion criteria should be given. In case-control studies, a case-definition and source for controls should be given.</i>				
4.	Are the interventions of interest clearly described? <i>Treatments and placebo (where relevant) that are to be compared should be clearly described.</i>				
5.	Are the distributions of principal confounders in each group of subjects to be compared clearly described? <i>A list of principal confounders is provided</i>				
6.	Are the main findings of the study clearly described? <i>Simple outcome data (including denominators and numerators) should be reported for all major findings so that the reader can check the major analyses and conclusions. (This question does not cover statistical test which are considered below)</i>				
7.	Does the study provide estimates of the random variability in the data for the main outcomes? <i>In non-normally distributed data the inter-quartile range of results should be reported. In normally distributed data the standard error, standard deviation or confidence intervals should be reported. If distribution data is not described, it must be assumed that the estimates used were appropriate and the question should be answered with yes.</i>				
8.	Have all important adverse events that may be a consequence of the intervention been reported? <i>This should be answered yes if the study demonstrates that there was a comprehensive attempt to measure adverse events. (A list of possible adverse events is provided).</i>				
9.	Have the characteristics of subjects lost to follow-up been described? <i>This should be answered yes where there were no losses to follow-up or where losses to follow-up were so small that findings would be unaffected by their inclusion. This should be answered no, where a study does not report the number of patients lost to follow-up.</i>				
10.	Have actual probability values been reported (e.g. 0.035 rather than <0.05) for the main outcomes except where the probability value is less than 0.001?				
External validity					
11.	Were the subjects asked to participate in the study representative of the entire population from which they were recruited? <i>The study must identify the source population for subjects and describe how the subjects were selected. Subjects would be representative if they comprised the entire source population, an unselected sample of consecutive patients, or a random sample. Random sampling is only feasible where a list of all members of the relevant population exists. Where a study does not report the proportion of the source population from which the subjects are derived, the question should be answered as unable to determine.</i>				
12.	Were those subjects who were prepared to participate representative of the entire population from which they were recruited? <i>The proportion of those asked who agreed should be stated. Validation that the sample was representative would include demonstrating that the distribution of the main confounding factors was the same in the study sample and the source population.</i>				
13.	Were the staff, places, and facilities where the patients were treated, representative of the treatment the majority of patients receive? <i>For the question to be answered yes, the study should demonstrate that the intervention was representative of that in use in the source population. The question should be answered no if, for example, the intervention was undertaken in a specialist centre unrepresentative of the hospitals most of the source population would attend.</i>				
Internal Validity					

14.	Was an attempt made to blind study subjects to the intervention they have received? <i>For studies where the patients would have no way of knowing which intervention they received, this should be answered yes.</i>
15.	Was an attempt made to blind those measuring the main outcomes of the intervention?
16.	If any of the results of the study were based on “data dredging”, was this made clear? <i>Any analyses that had not been planned at the outset of the study should be clearly indicated. If no retrospective unplanned subgroup analyses were reported, then answer yes.</i>
17.	In trials and cohort studies, do the analyses adjust for different lengths of follow-up, or in case-control studies, is the time period between the intervention and outcome the same for cases and controls? <i>Where follow-up was the same for all study subjects the answer should be yes. If different lengths of follow-up were adjusted for by, for example, survival analysis the answer should be yes. Studies where differences in follow up are ignored should be answered no.</i>
18.	Were the statistical tests used to assess the main outcomes appropriate? <i>The statistical techniques used must be appropriate to the data. For example nonparametric methods should be used for small sample sizes. Where little statistical analysis has been undertaken but where there is no evidence of bias, the question should be answered yes. If the distribution of the data (normal or not) is not described it must be assumed that the estimates used were appropriate and the question should be answered yes.</i>
19.	Was compliance with the intervention/s reliable? <i>Where there was noncompliance with the allocated treatment or where there was contamination of one group, the question should be answered no. For studies where the effect of any misclassification was likely to bias any association to the null, the question should be answered yes.</i>
20.	Were the main outcome measures used accurate (valid and reliable)? <i>For studies where the outcome measures are clearly described, the question should be answered yes. For studies which refer to other work or that demonstrates the outcome measures are accurate, the question should be answered as yes.</i>
Internal Validity – confounding (selection bias)	
21.	Were the subjects in different intervention groups or were they recruited from the same population? <i>For example, patients for all comparison groups should be selected from the same hospital. The question should be answered unable to determine for cohort and casecontrol studies where there is no information concerning the source of patients included in the study.</i>
22.	Were study subjects in different intervention groups or were they recruited over the same period of time? <i>For a study which does not specify the time period over which patients were recruited, the question should be answered as unable to determine.</i>
23.	Were study subjects randomised to intervention groups? <i>Studies which state that subjects were randomized should be answered yes except where method of randomisation would not ensure random allocation. For example, alternate allocation would score no because it is predictable.</i>
24.	Was the randomised intervention assignment concealed from both patients and health care staff until recruitment was complete and irrevocable? <i>All non-randomised studies should be answered no. If assignment was concealed from patients but not from staff, it should be answered no.</i>
25.	Was there adequate adjustment for confounding in the analyses from which the main findings were drawn? <i>This question should be answered no for trials if: the main conclusions of the study were based on analyses of treatment rather than intention to treat; the distribution of known confounders in the different treatment groups was not described; or the distribution of known confounders differed between nonrandomized studies if the effect of the main confounders was not investigated or confounding was demonstrated but no adjustment was made in the final analyses the question should be answered as no.</i>
26.	Were losses of subjects to follow-up taken into account? <i>If the numbers of subjects lost to follow-up are not reported, the question should be answered as unable to determine. If the proportion lost to follow-up was too small to affect the main findings, the question should be answered yes.</i>
Power	
27.	Did the study have sufficient power to detect a clinically important effect where the probability value for a difference being due to chance is less than 5%? <i>Sample sizes have been calculated to detect a difference of x% and y.</i>

ANNEXE D : Échelle de qualité méthodologique AMSTAR 2

Items	Cotation
1	Est-ce que les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue ont inclus les critères PICO ?
2	Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de conduire la revue ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?
3	Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'étude à inclure dans la revue ?
4	Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?
5	Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ?
6	Les auteurs ont-ils effectuée en double l'extraction des données ?
7	Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ?
8	Les auteurs ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ?
9	Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?
10	Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financement des études incluses dans la revue ?
11	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?
12	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'une autre synthèse des preuves ?
13	Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation / de la discussion des résultats de la revue ?
14	Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue, et une discussion sur celle-ci ?
15	S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publication (biais de petite étude) et ont discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?
16	Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêts, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ?

ANNEXE E : Tableau récapitulatif de l'étude de *Sancho et al.*

Sancho et al. (Igor SANCHO, Peter MALLIARAS, Christian BARTON, Richard W. WILLY, Dylan MORRISEY)	Date	2019
	P	Coureurs adultes (>18 ans), récréatifs ou compétitifs, sains ou présentant une tendinopathie d'Achille
	I	Analyse des paramètres biomécaniques de la course à pied
	C	Comparaison entre les coureurs sains et les coureurs avec tendinopathie d'Achille
	O	Paramètres biomécaniques : - cinématiques (cheville, genou hanche) - cinétiques (forces de réaction au sol, moments articulaires)
	Principaux résultats	Absence de différence significatives pour les variables biomécaniques incluses en méta-analyse Quelques différences significatives pour des variables isolées : - Augmentation de la durée de pronation - Augmentation de l'éversion en phase de propulsion - Augmentation de la rotation interne de hanche Absence de profil biomécanique spécifique
Évaluation méthodologique par AMSTAR 2 : niveau de confiance modéré		
Score EQM		
Biais	Hétérogénéité méthodologique importante entre les études incluses : - Variabilité des protocoles d'analyses (biais de confusion) - Différence dans les critères diagnostiques des TA (biais de classification erronée) - Échantillon faible pour certaines études (biais de sélection)	
Validité externe	Bonne validité externe : inclusion de coureurs de différents niveaux, âges et sexes dans des conditions d'analyses variées permettant une généralisation des résultats à la population des coureurs	
Validité statistiques	- Nombre de variables regroupées en méta-analyse réduit - Intervalle de confiance incluant fréquemment zéro : peu de différences significatives - Puissance statistique limitée pour certaines analyses : prudence d'interprétation	
Pertinence clinique	- Vision globale des facteurs cinématiques et cinétiques associés à la TA - Souligne l'absence d'un profil biomécanique évident - Soutient une approche individualisée en kinésithérapie	

ANNEXE F : Tableau récapitulatif de l'étude d'*Aubol et Milner*.

Aubol et Milner	Date	2024
	P	14 coureurs adultes (>18 ans) hommes courant >16km par semaine réparti en deux groupes : sain et avec TA (ou antécédent) et tous avec un pattern d'attaque de pied RFS
	I	Analyse biomécanique cinématique et cinétique de la course à pied (laboratoire)
	C	Comparaison entre les coureurs du groupe sain et les coureurs du groupe TA
	O	Paramètres biomécaniques : - cinématiques (cheville et pied) - cinétiques Exploration de deux mécanismes hypothétiques : « whipping » et « tearing »
	Principaux résultats	Absence de différence significative pour : - le pic d'éversion et la durée d'éversion - le pic d'inversion - la dorsiflexion de cheville - l'absorption des forces à la cheville Hypothèse: « whipping » et « tearing » non confirmées
	Score EQM	Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité modérée
	Biais	- Échantillon de faible volume, population exclusivement masculine, coureurs RFS (biais de sélection) - Perte de participants au cours du suivi (biais d'attrition) - Volume d'entraînement plus élevé dans le groupe TA (biais de confusion) - Inclusion des coureurs avec antécédent de TA dans le groupe (biais de classification erronée)
	Validité externe	Validé externe limitée : population étudiée assez spécifique nécessitant de la prudence dans l'extrapolation des résultats à la population des coureurs
	Validité statistiques	Faible puissance statistique du fait de la taille de l'effectif
	Pertinence clinique	Remet en question les facteurs de risques classiquement cités lors du lien entre TA et biomécanique de course Interroge sur la pertinence d'inclure ces paramètres en pratique clinique

ANNEXE G : Tableau récapitulatif de l'étude de *Nishiguchi et al.*

Nishiguchi et al. (Honoka NISHIGU CHI, Tomoya TAKABAY ASH, Takanori KIKUMO TO, Masayoshi KUBO)	Date	2025
	P	20 hommes adultes en bonne santé et physiquement actif sans antécédent de blessure aux membres inférieurs
	I	Manipulations expérimentales des patterns d'attaque du pied : - Rearfoot/arrière-pied (RFS) - Midfoot/médio-pied (MFS) - Forefoot/avant-pied (FFS)
	C	Comparaison intra-sujet sur la charge tendineuse entre les trois patterns
	O	Charge appliquée au tendon d'Achille : - force maximale - charge cumulative - impulsion Paramètres biomécaniques : cinétique (pic d'impact), spatio-temporel (TCS)
	Principaux résultats	Le pattern FFS entraîne : - une augmentation de la force maximale sur le tendon d'Achille - une augmentation de la charge cumulative - une augmentation de l'impulsion Un pattern RFS entraîne : - Une diminution des contraintes internes au tendon d'Achille - Une augmentation du pic d'impact et du taux de charge externe Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité modérée
	Score EQM	
	Biais	- Population uniquement masculine, pas explicitement des coureurs (biais de sélection) - Conditions expérimentales contrôlées et pattern imposé (non naturel) (biais écologique)
	Validité externe	Validé externe limitée : résultats applicables avec prudence aux coureurs entraînés
	Validité statistiques	Forte du fait de l'évaluation intra-sujet : limite les variabilités inter-individuelles Nombreux résultats significatifs avec des tailles d'effet importantes Effectif limité
	Pertinence clinique	Étude importante dans la compréhension de l'impact des patterns sur la charge tendineuse Souligne la dissociation entre contraintes internes et contraintes externes, essentielle pour l'interprétation Remet en question les intérêts et les croyances sur l'attaque FFS

ANNEXE H : Tableau récapitulatif de l'étude de *Starbuck et al.*

Starbuck et al. (Chelsea STARBUC K, Christopher r BRAMAH, Lee HERRING TON, Richard JONES)	Date	2021
	P	20 coureurs entraînés (10 femmes et 10 hommes) et performants sans blessure récente
	I	Variations expérimentales de la vitesse de course : - 3,3 m/s ; 3,9 m/s ; 4,8 m/s ; 5,6 m/s
	C	Comparaison intra-sujet sur la charge tendineuse entre les différentes vitesses de course
	O	Charge appliquée au tendon d'Achille : - force maximale - force cumulative - taux de charge Paramètres biomécaniques : cinétiques, cinématiques et spatio-temporels
	Principaux résultats	L'augmentation de la vitesse entraîne : - une augmentation de la force maximale sur le tendon d'Achille - une augmentation de la force cumulative - une augmentation du taux de charge - une modification de paramètres biomécaniques : augmentation de la longueur de foulée, diminution de TCS, augmentation du temps de vol, augmentation de la cadence
	Score EQM	Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité modérée
	Biais	- Population de coureurs performants (biais de sélection) - Conditions expérimentales contrôlées et vitesse imposée (biais écologique) - Analyse des charges tendineuses indirecte (par modélisation) (biais de mesure)
	Validité externe	Validé externe modéré : plutôt représentatif pour des coureurs RFS mais à remettre en question du fait des conditions en laboratoire
	Validité statistiques	Forte du fait de l'évaluation intra-sujet : limite les variabilités inter-individuelles Nombreux résultats significatifs et bonnes puissances statistiques
	Pertinence clinique	Très pertinent pour la pratique en kinésithérapie dans la gestion de la charge des coureurs souffrant de TA Met en évidence un paramètre modifiable avec une influence direct sur la charge tendineuse

ANNEXE I : Tableau récapitulatif de l'étude d'Aubol et al.

Aubol et al. (Kevin G. AUBOL, Karin GRÄVARE SILBERN AGEL, Josh R. BAXTER, Patricia A. SHEWOKI S, Clare E. MILNER)	Date	2025
	P	30 coureurs adultes (>18 ans) tous avec un pattern d'attaque de pied RFS et sans antécédent de blessure au tendon d'Achille avant et pendant l'étude
	I	Modifications expérimentales : - de la cadence (libre/imposée) - du temps de contact au sol (TCS) (faible/préférentiel/élevé)
	C	Comparaison intra-sujet sur la charge tendineuse entre les différentes cadences et les différents TCS
	O	Charge appliquée au tendon d'Achille : - force maximale - charge cumulative - impulsion Paramètres spatio-temporels : - vitesse - TCS - cadence
	Principaux résultats	La manipulation du TCS par simple consigne orale est efficace : intervention simple Une augmentation du TCS entraîne une diminution des charges appliquées au tendon d'Achille Il existe une interaction significative entre le TCS et la cadence (> du TCS = <cadence) Aucune influence significative sur la vitesse
	Score EOM	Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité élevée
Biais		
- Coureur exclusivement RFS (biais de sélection) - Condition en laboratoire et protocole imposé (modifications non naturelles) (biais écologique) - Estimations des forces tendineuses indirectes (biais de mesure)		
Validité externe		
Validé externe modéré : plutôt représentatif pour des coureurs RFS mais à remettre en question du fait des conditions en laboratoire		
Validité statistiques		
Forte du fait de l'évaluation intra-sujet : limite les variabilités inter-individuelles Nombreux résultats significatifs et bonnes puissances statistiques		

ANNEXE J : Tableau récapitulatif de l'étude de *Lyght et al.*

Lyght et al. (Michael LYGHT, Matthew NOCKERTS, Thomas W. KERNOZE K, Robert RAGAN)	Date	2016
	P	19 femmes adultes (>18 ans) coureuses récréatives sans antécédent de blessure aux membres inférieurs
	I	Modification expérimentale : - De la cadence (+5% et -5%) - Du pattern d'attaque du pied (RFS/FFS)
	C	Comparaison intra-sujets entre les différents paramètres
	O	Contraintes appliquées au tendon d'Achille : - Stress tendineux - Force - Allongement du tendon - Vitesse d'étirement du tendon Paramètres cinématiques (genou, cheville)
	Principaux résultats	Un pattern FFS (comparativement au RFS) augmente : - Le stress tendineux, la force achilléenne, l'étirement du tendon et sa vitesse d'étirement - La flexion de genou - La flexion plantaire au contact initial Un pattern RFS diminue les contraintes (-24% stress tendineux) - Une augmentation de la cadence de +5% entraîne (comparativement à cadence neutre et cadence -5%) : - Une diminution du stress tendineux et de l'allongement du tendon Pas de modification significative en cadence -5%
Score EQM		
Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité modérée		
Biais		
- Taille de l'effectif, population féminine uniquement (biais de sélection) - Manipulation volontaire des paramètres (donc non naturel) - Condition expérimentale : laboratoire (biais écologique)		
Validité externe		
Validé externe modérée : résultats applicables pour des coureuses récréatives, à extrapoler avec prudence pour une population plus générale		
Validité statistiques		
- Analyse intra-sujet : réduit les variabilités interindividuelles - Résultats fortement significatifs		
Pertinence clinique		
- Montre que la cadence et le pattern d'attaque influencent les contraintes du tendon d'Achille - Souligne l'importance de la gestion de la vitesse dans la rééducation des coureurs - Permet d'intégrer une notion de progressivité dans la charge en pratique clinique		

ANNEXE K : Tableau récapitulatif de l'étude de Skypala et al.

Skypala et al. (Jiri SKYPALA, Joseph HAMILL, Michal SEBERA, Steriani ELAVSKY, Andrea MONTE, Daniel JANDACK A)	Date	2023
	P	Coureurs adultes (>18 ans) récréatifs sans antécédents de blessures et suivis sur 12 mois
	I	Analyse prospective de l'évolution des coureurs
	C	Comparaison entre les coureurs restant sains et les coureurs développant une TA au cours du suivi
	O	Paramètres biomécaniques : - cinématiques (cheville, genou, pattern d'attaque du pied) - spatio-temporels (vitesse) Survenue d'une tendinopathie d'Achille
	Principaux résultats	Peu de différences significatives entre les groupes : - Augmentation significative de la flexion de genou au contact initial et en phase d'appui chez le groupe TA (association statistique selon régression logistique) Absence de différence significative pour la vitesse et le pattern d'attaque du pied Résultats globaux hétérogènes et peu discriminants
	Score EQM	Évaluation méthodologique selon Downs & Black : qualité élevée
	Biais	- Diagnostic des tendinopathies d'Achille basée sur un auto-questionnaire (biais de classification erronée) - Échantillon de faible volume (biais de sélection) - Perte de participants au cours du suivi et qualité du suivi sur 12 mois (biais d'attrition) - Choix des paramètres biomécaniques étudiés (biais de mesure)
	Validité externe	Validé externe modérée : inclusion de coureurs récréatifs à bas volume, rendant la population spécifique et limitant la généralisation des résultats aux coureurs compétitifs et/ou à haut volume
	Validité statistiques	- Utilisation de régression logistique - Nombre de variables significatives très limité - Puissance statistique limitée pour certaines analyses : prudence d'interprétation
	Pertinence clinique	- Identification d'une potentielle association biomécanique à clinique - Souligne l'absence d'un profil biomécanique évident - Soutient une approche individualisée en kinésithérapie

ANNEXE L : Synthèse des scores « Downs and Black » des études par items

Etude/Item	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	Total
Lyght et al.																												19
Skypala et al.																												21
Aubol et al.																												20
Aubol et al.																												18
Milner																												18
Nishiguchi et al.																												18
Starbuck et al.																												19

	= Oui
	= Partiellement
	= Non/Impossible à déterminer

ANNEXE M: Synthèse du score AMSTAR 2 pour la méta-analyse de *Sancho et al.*

:

—

Étude/Item	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
Sancho et al.																

	= Oui
	= Partiellement
	= Non/Impossible à déterminer

Diplôme d'État de Masseur-Kinésithérapeute

L'adaptation des paramètres biomécaniques de la course à pied dans la prise en charge des coureurs atteints de tendinopathie d'Achille

NONNON Corentin

Résumé :

Introduction : La course à pied présente des effets bénéfiques sur la santé, mais expose à des contraintes mécaniques. Ces contraintes sont à l'origine de blessures, telles que la tendinopathie d'Achille. La course à pied résulte d'un ensemble de systèmes, dont le système biomécanique qui influence les charges transmises à ce tendon.

Méthode : Cette revue a utilisé les bases de données **PubMed**, **SPORTDiscus** et **Scopus**. Une méta-analyse, deux études prospectives et quatre études expérimentales ont été incluses. Les résultats ont été synthétisés afin d'identifier les facteurs en lien avec la tendinopathie d'Achille.

Résultats : Aucun profil spécifique de coureur à risque n'a pu être identifié mais des paramètres biomécaniques influençant la charge tendineuse ont été mis en évidence.

Conclusion : Les résultats de cette revue s'intègrent dans un système global autour de la notion de charge, dans lequel certains paramètres biomécaniques sont pertinents dans la prise en charge kinésithérapique des coureurs atteints de tendinopathie d'Achille.

Mots clés : tendon d'Achille, tendinopathie d'Achille, course à pied, paramètres biomécaniques, kinésithérapie

Summary:

Introduction: Running offers health benefits, but it also exposes the body to mechanical stresses. The stresses can lead to injuries, like the Achilles tendinopathy. Running implies a combination of systems, including biomechanical system, which influences the loads transmitted to this tendon.

Method: This review utilised the **PubMed**, **SPORTDiscus** and **Scopus** databases. One meta-analysis, two prospective observational studies and four experimental studies were included. The results were synthesised to identify factors associated with Achilles Tendinopathy.

Results: No specific profile of a runner at risk could be identified, but biomechanical parameters influencing this tendon load were highlighted.

Conclusion: The results of this review form a part of a comprehensive system centred on the concept of load, within which some biomechanical parameters are relevant to be incorporated into the physiotherapy management of runner with Achilles tendinopathy.

Key words: Achilles tendon, Achilles tendinopathy, running, biomechanical parameters, physiotherapy