

Évaluation de la fatigue musculaire de cheville avec un outil de déstabilisation : étude comparative entre des sujets sains et des sujets instables chroniques de cheville

Assessment of ankle muscle fatigue with a destabilization tool: A comparative study between healthy and chronic ankle unstable subjects

A. Aguilaniu^{a1} J.-L. Croisier^{a,b} J.-F. Kaux^b C. Schwartz^a

^aUniversité de Liège, LAM-Motion Lab, 4000 Liège, Belgique

^bCentral University Hospital of Liège, Physical Medicine and Sports Traumatology Department, 4000 Liège, Belgique

KEYWORDS: *Ankle sprain; Chronic ankle instability; Muscle fatigue Rehabilitation; Reproducibility of results*

RÉSUMÉ

Introduction. – L'entorse latérale de cheville est la blessure la plus fréquente. La fatigue semble jouer un rôle dans ce traumatisme car c'est aussi en fin de match (football, rugby, . . .) qu'elle se produit le plus souvent. L'objectif de cette étude est d'évaluer la reproductibilité d'un test de résistance à la fatigue et de comparer les scores entre des sujets sains et des sujets ayant une instabilité chronique de cheville (Chronic Ankle Instability).

Méthode. – Un total de 19 sujets sains et 11 sujets CAI ont réalisé un test de résistance à la fatigue en appui unipodal avec une chaussure de déstabilisation. Les sujets devaient réaliser un nombre maximal de répétitions d'inversion lente et d'éversion rapide. Ce test a été réalisé à deux reprises à une semaine d'intervalle.

Résultats. – La reproductibilité relative était très bonne pour les sujets sains (ICC = 0,95) et modérée

¹ Auteur correspondant. Adresse e-mail : aude.aguilaniu@uliege.be

pour les sujets CAI (ICC = 0,58). L'erreur de mesure reste cependant relativement variable et élevée (SEM = 2,06–4,10 et MDC = 5,70–11,4). Les sujets sains ont été significativement plus résistants à la fatigue que les sujets CAI ($p = 0,02$).

Conclusion. – Le test de résistance à la fatigue est reproductible. Toutefois, il est probable que l'arrêt du test puisse être parfois lié à une incapacité motrice sans lien avec la fatigue. Les sujets instables chroniques présentent une résistance à la fatigue significativement plus faible que les sujets sains démontrant l'intérêt du test en pratique clinique. Un seuil ≤ 8 répétitions est proposé comme limite pour identifier un déficit.

ABSTRACT

Introduction. – Lateral ankle sprain is the most common injury. Fatigue seems to play a role in this injury as it is also at the end of a match (soccer or rugby) that ankle sprain occur most often. The objective of this study was to evaluate the reproducibility of a fatigue strength test and to compare the scores between healthy subjects and subjects with chronic ankle instability (CAI). *Method.* – A total of 19 healthy subjects and 11 CAI subjects performed a fatigue strength test on one leg support with a destabilizing sandal. Subjects were required to perform a maximum number of repetitions of the slow inversion and fast eversion. This test was performed on two occasions one week apart. *Results.* – The relative reproducibility was very good for the healthy subjects (ICC = 0.95) and moderate for the CAI subjects (ICC = 0.58). The measurement error remained relatively variable and high (SEM = 2.06–4.10 and MDC = 5.70–11.4). Healthy subjects were significantly more resistant to fatigue than CAI subjects ($P = 0.02$).

Conclusion. – The fatigue test is reproducible. However, it seems that the failure of the test in some subjects may be related to motor disability unrelated to fatigue. Chronically unstable subjects have significantly lower fatigue resistance score than healthy subjects demonstrating the interest of the test in clinical practice. A threshold ≤ 8 repetitions is proposed as the limit for identifying a deficit.

INTRODUCTION

L'entorse latérale de cheville (ELC) est la blessure musculo-squelettique la plus fréquente dans le sport mais également dans la population générale [1,2]. L'ELC se produit fréquemment au contact du sol après une inversion soudaine parfois couplée à une flexion plantaire [3,4]. Ce mécanisme lésionnel augmente le bras de levier entre le sol et l'articulation de la cheville avec un étirement

excessif qui entraîne des dommages des ligaments latéraux. Un antécédent d'ELC est le principal facteur de risque d'un nouvel épisode [5] mais, en tant que professionnels de santé, nous ne pouvons pas modifier cet événement passé. En revanche, de nombreux facteurs de risque modifiables ont été décrits dans la littérature. Ainsi, une amplitude articulaire limitée, des déficits de stabilité posturale, de proprioception, de force musculaire, mais également un temps de réaction musculaire plus long peuvent participer à l'augmentation du risque d'ELC [5,6]. Après une ELC, ces déficits peuvent être comblés grâce à la rééducation. Cependant, dans 40 % des cas une instabilité chronique de cheville (CAI) persiste [7]. Les personnes CAI peuvent conserver ou même développer un ensemble de symptômes [8] qui contribuent non seulement au taux de récurrence élevé, mais également à l'apparition précoce d'arthrose [9].

Certaines études épidémiologiques portant sur plusieurs sports montrent qu'une grande partie des blessures, comme les ELC, surviennent dans la seconde moitié des matchs [10–12]. La fatigue pourrait alors jouer un rôle dans leur apparition. De plus, en condition de fatigue les facteurs de risque d'ELC sont impactés négativement [13]. Par exemple, les capacités de contrôle postural [14], y compris la proprioception locale de la cheville, sont aussitôt diminuées après un protocole de fatigue de la cheville [15]. Cette dernière joue donc un rôle dans l'augmentation du risque d'ELC. La fatigue est définie comme "l'incapacité de continuer à travailler à une intensité d'exercice donnée" [16]. Maintenir un exercice à un certain niveau d'intensité permet de déterminer la capacité de résistance à la fatigue. Elle peut donc être évaluée de manière locale comme lors de la réalisation d'un test de performance musculaire répété ciblé, ou plutôt globale comme lors d'exercices prolongés ou d'événements sportifs [17]. Dans un contexte post-entorse de cheville, une méthode de terrain pour évaluer la fatigue locale des éverseurs de cheville a été brièvement décrite avec l'utilisation d'une chaussure de déstabilisation [18]. Cependant, la reproductibilité de cette méthode n'a pas été évaluée. L'objectif de cette étude est de l'évaluer puis de comparer les scores entre une population CAI et une population saine. Nous avons également observé les liens éventuels entre le score de résistance à la fatigue et des mesures de force musculaire isométrique de cheville.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

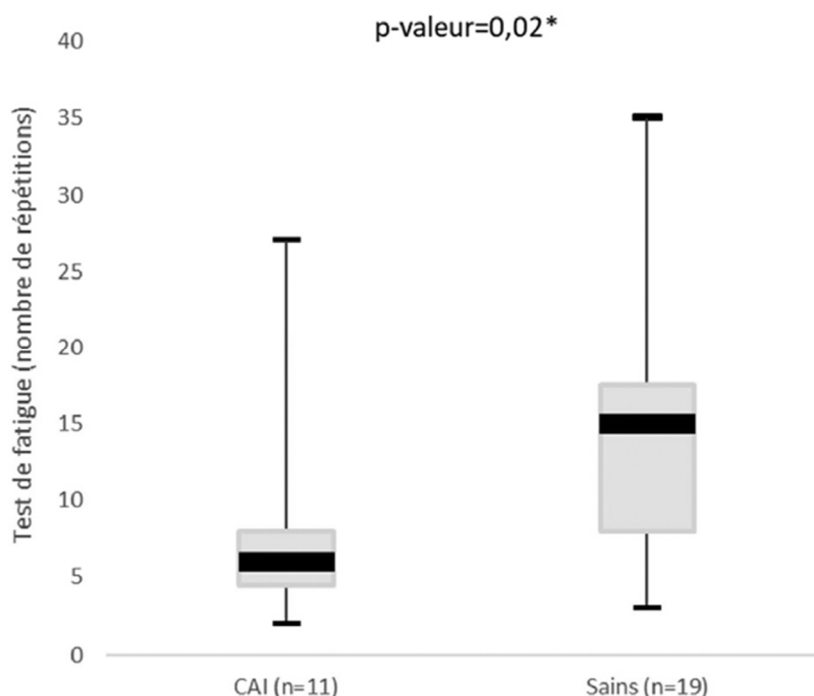
Un total de 40 jeunes adultes, avec ou sans antécédents d'entorse de cheville, se sont portés volontaires pour participer à l'étude. Dix-neuf d'entre eux (11 hommes, 8 femmes ; âge $23,1 \pm 2,2$ ans, IMC $23,3 \pm 3,9$ kg/m²) ont été retenus dans le groupe de sujets sains : (1) pas d'antécédent d'entorse de cheville ; (2) un score >23 au Cumberland Ankle Instability Tool (CAIT) [19,20] et/ou un nombre de "oui" <6 au Ankle Instability Instrument (All) [21,22]. Toujours parmi ces volontaires, 11 d'entre eux (7 hommes, 4 femmes ; âge $23,5 \pm 4,1$ ans, IMC $24,0 \pm 2,5$ kg/m²) ont été retenus dans le groupe de sujets CAI : (1) au moins un antécédent d'entorse de cheville ; (2) un score ≤ 23 au CAIT et/ou un nombre de "oui" ≥ 6 au All. Dix jeunes adultes ont été exclus de l'étude car ils avaient soit un antécédent d'entorse avec un score >23 au CAIT et/ou un nombre de "oui" <6 au All, soit ils n'avaient pas d'antécédent d'entorse et présentaient un score ≤ 23 au CAIT et/ou un nombre de "oui" ≥ 6 au All. Pour l'ensemble des deux groupes retenus (19 sujets sains et 11 sujets CAI) aucun sujet n'avait d'antécédent de chirurgie des membres inférieurs, ni aucune maladie qui aurait pu influencer le contrôle neuromusculaire ou diminuer leur capacité à effectuer des exercices fonctionnels. L'ensemble des participants ont donné leur consentement écrit et éclairé et leurs droits étaient protégés. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'hôpital Universitaire de Liège (Belgique).

Les participants étaient invités à venir à deux reprises à une semaine d'intervalle et approximativement au même moment de la journée. Les évaluations étaient réalisées lors de la première séance et seul le test de résistance à la fatigue était réalisé lors de la seconde séance pour évaluer la reproductibilité de celui-ci.

Pour le test de résistance à la fatigue, le participant portait une chaussure de déstabilisation (Myolux™ Medik II, CEVRES Santé, France) du côté testé. Un bloc d'une hauteur de 2,5 cm était placé sous le talon. La chaussure de déstabilisation est composée d'un articulateur permettant un mouvement d'inversion et d'éversion avec une inclinaison de 428 dans le plan frontal selon l'axe de Henké [23]. En condition de mise en charge, l'articulateur se déplace automatiquement en inversion. Pour le test, l'articulateur était réglé sur la troisième position permettant un mouvement de -5° à 30° d'inversion.

La partie avant du pied était en position instable afin de ne pas adhérer au sol pendant le mouvement.

Figure 1. Test de résistance à la fatigue de cheville.



Avant de réaliser le test de résistance à la fatigue, un échauffement de 10 minutes avec des mobilisations, des mouvements lents puis rapides de la cheville, du genou et de la hanche ont été réalisés. La session de familiarisation commençait par deux mouvements d'inversion/éversion guidés par les mains de l'évaluateur afin d'aider le sujet à bien comprendre le mouvement avec la chaussure de déstabilisation. Ensuite, de manière autonome, les participants ont réalisé 10 répétitions du mouvement d'inversion et d'éversion en position assise, 5 répétitions en position bipodale et 3 répétitions en position unipodale. Un temps de repos d'une minute et trente secondes était respecté entre chaque position pour éviter de provoquer de la fatigue. Avant de commencer le test, trois minutes de repos étaient accordées.

Lors du test de résistance à la fatigue, les sujets testés étaient debout sur une jambe face au mur. La position de départ du pied était en éversion maximale (Fig. 1). Il était demandé au sujet d'enchaîner un mouvement d'inversion lente en deux secondes (travail des éverseurs en excentrique) puis d'éversion rapide en une seconde (travail des éverseurs en concentrique). Afin de standardiser l'enchaînement des mouvements, il était demandé au participant de suivre le rythme imposé par un

métronome. Les sujets devaient réaliser un maximum de répétitions sachant qu'une répétition était considérée comme un mouvement d'inversion et un mouvement d'éversion. Il leur était également demandé de garder le genou en extension, de fixer la hanche (pas de rotation) et de garder un léger contact des mains avec le mur pour maintenir l'équilibre. Pour les deux répétitions, l'évaluateur encourageait positivement le participant, mais aucun feedback correctif n'a été donné pendant le test.

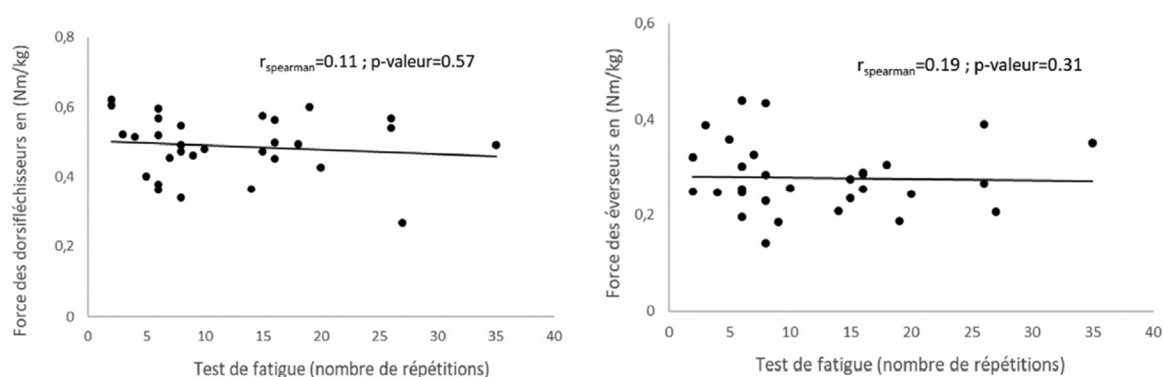
Nous avons également mesuré la force musculaire isométrique des éverseurs et des dorsifléchisseurs de la cheville à l'aide d'un dynamomètre manuel (MicroFET, Hoggan Health Industries, Draper, UT, USA). La force musculaire isométrique des dorsifléchisseurs et des éverseurs a été évaluée comme le décrit une étude précédente [24]. Le pied du participant était placé en position neutre pour les deux positions. Le participant devait tirer ou pousser contre le dynamomètre manuel de manière progressive pour atteindre la force maximale qu'il était capable de développer dans chaque direction. L'évaluateur contraignait cette force en fixant l'outil avec les deux mains (*Fig. 2*). Un essai durait entre trois et cinq secondes. Les valeurs en Newton ont été multipliées par le bras de levier en mètre, puis normalisées par le poids de chaque sujet. La valeur maximale des trois essais a été retenue pour l'analyse.

ANALYSES STATISTIQUES

Pour l'évaluation de la reproductibilité du test de résistance à la fatigue, un total de 27 sujets a été analysé, car trois sujets sains n'ont pas pu revenir lors de la seconde séance pour des raisons organisationnelles. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team 2021) avec le package psych 1,0.12 et le package Rcmdr 1,7-1. Le test de Shapiro-Wilk a permis d'établir la normalité des distributions. Les variables suivant une distribution normale ont été analysées en considérant la moyenne et l'écart-type tandis que celles avec une distribution non normale ont été analysées selon la médiane et l'écart interquartile entre le 1^{er} quartile et le 3^e quartile (Q1-Q3). Un coefficient de corrélation intraclasse (ICC) avec ses limites de confiance inférieure et supérieure à 95 % a été calculé pour comparer les scores entre la première et la seconde session. Le modèle « ICC₂ » a été utilisé. Par convention, l'ICC $\geq 0,91$ est considéré comme très bon, entre $0,90 \leq \text{ICC} \leq 0,71$ comme bon, entre $0,70 \leq \text{ICC} \leq 0,51$ comme modéré, entre $0,50 \leq \text{ICC} \leq 0,31$ comme médiocre et très mauvais ou nul si l'ICC $\leq 0,30$ [25]. L'erreur standard de mesure (SEM) et le changement minimal détectable (MDC) ont également été calculés. Pour la comparaison des

groupes entre la session 1 et la session 2, un test t de Student apparié ou un test de Wilcoxon apparié a été calculé selon la normalité des distributions des variables. Un test de Mann Whitney a été utilisé pour comparer les scores de fatigue entre les sujets sains et les sujets instables. Des corrélations de Spearman ont été utilisées pour mettre en lien la force musculaire et le score au test de résistance à la fatigue.

Figure 2. Test de force isométrique avec dynamomètre manuel.



RÉSULTATS

Les deux groupes composant la population étudiée sont décrits dans le *Tableau I*. Les valeurs de reproductibilité (*Tableau II*) montrent que les ICC du test de résistance à la fatigue sont bons pour la population saine (ICC = 0,95) et modérés (ICC = 0,58) pour la population d'instables chroniques. Le SEM et le MDC sont plus faibles chez les sujets sains que chez les sujets CAI. Pour les deux populations, il n'y a pas de différence significative ($p = 0,02$) entre les scores de la première et de la seconde session. Les sujets sains sont significativement meilleurs que les sujets CAI lors du test de résistance à la fatigue ($p < 0,02$) (*Fig. 3*). Sur la base des résultats obtenus dans la population saine, nous avons déterminé un seuil de normalité quant au score de résistance à la fatigue. Ce seuil a été calculé sur la base du percentile 20 et s'élève à 7,6 répétitions.

Le score du test de résistance à la fatigue n'est ni corrélé à la force des dorsifléchisseurs ni à celle des éverseurs pour l'ensemble de la population (*Fig. 4*).

DISCUSSION

L'objectif de notre étude était de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation d'un test de résistance à la fatigue du mouvement d'éversion et d'inversion en charge pour comparer une population de sujets sains avec une population de sujets CAI. Cette étude est la première à évaluer la reproductibilité de ce test qui s'avère très bonne pour les sujets sains (ICC = 0,95) et modérée pour les sujets CAI (ICC = 0,58). Nous avons ensuite comparé ces deux populations. Les sujets sains ont un score significativement meilleur ($p=0,02$) que les sujets CAI. Finalement, nous n'avons pas objectivé de liens entre ce test de résistance à la fatigue et la force isométrique des muscles éverseurs et dorsifléchisseurs.

Bien que ce test ait été brièvement décrit dans un précédent article [18], il s'agit de la première étude qui évalue la reproductibilité du test de résistance à la fatigue des muscles de la cheville avec une chaussure de déstabilisation. Nous pouvons considérer que ce test est reproductible malgré un résultat modéré pour la population CAI (ICC = 0,58). Ce résultat est expliqué par un seul sujet qui présente une différence de score importante entre les deux sessions. Du fait de la taille relativement limitée de la population CAI dans notre étude, l'influence d'un seul score amplifie le résultat global. Ce cas met en évidence que malgré une méthode contrôlée, des variabilités peuvent être liées au patient de manière individuelle. Cependant, aucune différence significative entre les scores de la session 1 et de la session 2 n'a été mise en évidence ($p > 0,05$) indiquant qu'en moyenne, les scores de résistance à la fatigue restent stables en l'absence d'interventions.

Tableau I. Description de la population totale ($n=30$).

	Sains ($n = 19$)	CAI ($n = 11$)	p -valeur
Age (moy $\pm$ sd)	23,1 $\pm$ 2,2	23,5 $\pm$ 4,1	0,747 ^a
Score CAIT/30 (med IQR)	30 (29-30)	19 (18-20)	<0,001 ^b
Score AII/9 (med IQR)	0,0 (0-1,5)	6,0 (5-6)	<0,001 ^b
IMC en kg/m ² (moy $\pm$ sd)	23,3 $\pm$ 3,9	24,0 $\pm$ 2,5	0,517 ^a
Taille en m (moy $\pm$ sd)	1,73 $\pm$ 0,09	1,75 $\pm$ 0,12	0,559 ^a
Sexe (femme)	42 %	36 %	0,757 ^c
Halasi/10 (med IQR)	6,0 (5-7)	9,0 (5-9)	0,064 ^b
Jambe (dominante)	58 %	36 %	0,260 ^c

moy $\pm$ sd : moyenne plus ou moins écart-type ; med IQR : médiane et écart interquartile (25%–75 %) ; m : mètre.

^at de Student non apparié.

^bMann–Whitney.

^cCh².

Tableau II. Reproductibilité et erreur de mesure du test de résistance à la fatigue.

Population	Session 1 med (IQR)	Session 2 med (IQR)	ICC ₂ (IC95 %)	SEM	MDC	p-valeur
Sains (n = 16)	14,5 (7,8–17)	14,0 (6,0–21)	0,95 (0,89–0,98)	2,06	5,70	0,74 ^a
CAI (n = 11)	6,00 (4,5–8,0)	7,00 (5,0–9,5)	0,58 (0,14–0,84)	4,10	11,4	0,67 ^b
Total (n = 27)	8,00 (6,0–16)	8,00 (5,5–17,5)	0,88 (0,78–0,93)	2,99	8,29	0,51 ^b

med IQR : médiane et écart interquartile (25 %–75 %) du nombre de répétitions

^at de Student apparié

^bWilcoxon apparié

Figure 3. Comparaison des sujets sains vs des sujets instables chroniques de cheville (CAI) au test de résistance à la fatigue.



D'autre part, les sujets CAI présentent également une erreur de mesure plus importante que les sujets sains (respectivement $SEM = 4,10$ et $SEM = 2,06$). Plus le SEM est faible, meilleure est la qualité de la mesure, car cet indice détermine les limites dans lesquelles se trouve le « vrai » score du sujet [26]. Le MDC est une extension du SEM qui nous permet d'interpréter cliniquement la mesure, car il représente le changement minimal nécessaire pour identifier un « réel » changement (une amélioration ou une détérioration) [27]. Dans notre étude, le MDC est relativement important avec un MDC de 6 répétitions pour les sujets sains et un MDC de 11 répétitions pour les sujets CAI.

Le score du test de résistance à la fatigue avec la chaussure de déstabilisation est significativement plus faible chez les sujets CAI qui obtiennent un score médian de 6 répétitions comparé aux sujets sains qui présentent un score médian de 15 répétitions. L'étude précédente ayant utilisé la chaussure de déstabilisation a également montré que les sujets CAI présentaient un score plus faible au test de fatigue que les sujets sains [18]. Ce test a donc un intérêt pour la pratique clinique, car il permettrait de détecter des faiblesses de résistance à la fatigue ou des faiblesses motrices au niveau des muscles éverseurs et dorsifléchisseurs de la cheville. Il permettrait d'affiner le bilan et donc la rééducation après une ELC. Nous avons déterminé qu'une valeur de 8 répétitions devrait être idéalement atteinte chez un sujet sain. L'étude de Terrier et Forestier [18] estime cette valeur seuil à 15 répétitions. Contrairement à ces auteurs, nous avons utilisé un métronome qui a pu rendre le test plus difficile. Le rythme imposé par le métronome a peut-être obligé les sujets à réaliser une phase excentrique plus lente que dans l'étude de Terrier et Forestier. Le temps sous tension des muscles éverseurs et dorsifléchisseurs aurait alors été plus long dans notre étude et la fatigue serait apparue sur un nombre moins important de répétitions. Par ailleurs, Terrier et Forestier ne donnent pas de précisions quant aux caractéristiques de la population qu'ils ont évaluée. Lors de la réalisation du test avec la chaussure de déstabilisation, les sujets réalisaient entre 2 et 35 répétitions. Or, il est établi que le temps nécessaire pour réaliser un test anaérobie est estimé à 30–40 secondes [28]. Étant donné qu'une répétition complète durait trois secondes (deux secondes vers l'inversion et une seconde vers l'éversion), les sujets qui n'obtenaient pas un score minimum de 10 répétitions ne solliciteraient pas cette filière. Dans ce cas, nous pouvons supposer que l'arrêt du test est plus en lien avec une incapacité motrice à la réalisation du mouvement plutôt qu'à une fatigue musculaire. Une proportion considérable (82 %) de sujets CAI n'atteignait pas ce seuil de 10 répétitions. Il est probable que pour ces sujets le test révélait un déficit autre qu'un déficit de résistance à la fatigue. Il semblerait que les déficits musculaires associés aux patients CAI pourraient être attribués à des différences

d'excitabilité des motoneurones et de recrutement plutôt qu'à des dommages des unités musculo-tendineuses [29]. Les faibles scores mettraient alors en évidence l'incapacité de recrutement des éverseurs et des dorsifléchisseurs. D'autre part, lors du test de résistance à la fatigue, la capacité de contrôle postural est relativement sollicitée. Or, les patients CAI présentent fréquemment des déficits de contrôle postural [29]. L'ensemble de ces implications contractiles et stabilisatrices de la cheville mettent en évidence la complexité des symptômes persistants après une ELC qui peuvent mener au développement d'une CAI [8].

Finalement, nous n'avons pas observé de lien significatif entre la force isométrique des éverseurs et des dorsifléchisseurs avec le test de résistance à la fatigue. Cependant, lors de ce test, la force des éverseurs et des dorsifléchisseurs était développée selon des modalités excentriques (lors de la descente) et concentriques (lors de la montée). La différence entre les modalités peut expliquer cette absence de corrélation.

Figure 4. Corrélation entre les tests de force musculaire et le test de fatigue $n = 30$.



D'autre part, la force musculaire isométrique, la capacité de résistance à la fatigue ainsi que le pourcentage d'activation musculaire sont autant d'éléments qui relèvent des capacités neuromusculaires, mais ne sont pas systématiquement liés les uns avec les autres. Le développement de CAI peut être en partie expliqué par certains déficits neuromusculaires, mais également par des déficits pathomécaniques et sensori-perceptifs qui sont eux-mêmes influencés par les facteurs personnels et environnementaux [8]. Il semble donc nécessaire d'évaluer les patients de manière complète pour prendre en compte l'ensemble des facteurs pouvant mener au développement de CAI

et au risque de se reblesser. Nous pouvons citer, de manière non exhaustive, d'autres évaluations comme celle de la douleur, la mesure de la mobilité, le déficit cinématique de l'articulation, le volume du gonflement, l'évaluation du contrôle postural et de la marche qui sont des éléments supplémentaires que la littérature recommande de prendre en considération en pratique clinique [30,31]. Plus les informations d'un patient recueillies lors d'un bilan sont complètes et pertinentes, meilleure est l'individualisation de la rééducation. Cette prise en charge individualisée consiste à mettre en place des traitements plus ciblés et d'augmenter l'efficacité de la rééducation. D'autres tests cités dans la littérature proposent une évaluation de la fatigue de cheville. Le « heel rise test » est ainsi décrit comme valide et reproductible ($ICC = 0,96$) [32]. Cependant, il évalue préférentiellement la fatigue des fléchisseurs plantaires à la différence de notre étude où les éverseurs et les dorsifléchisseurs sont ciblés. Bien qu'une faiblesse au niveau des fléchisseurs plantaires et dorsaux puisse être un facteur de risque d'ELC [33], le mécanisme lésionnel principal de l'ELC est contrôlé par l'action des muscles éverseurs et dorsifléchisseurs. Le test avec la chaussure de déstabilisation de notre étude semble alors plus proche du mécanisme lésionnel de l'ELC et serait donc plus spécifique pour une population CAI. Le « heel rise test », bien qu'il puisse être intéressant pour la détection des déficits dans un contexte d'ELC, permet plus fréquemment d'identifier des patients avec des tendinopathies calcanéennes [34]. D'autres méthodes décrites dans la littérature, contrairement au « heel rise test » et au test de fatigue décrit dans notre étude, ont pour objectif d'induire de la fatigue plutôt que de mesurer spécifiquement une résistance. Ce type de méthodes permet ainsi d'évaluer des tâches fonctionnelles en condition de fatigue. Par exemple, le contrôle postural peut être évalué avec et sans fatigue [35]. Ces méthodes d'évaluation considèrent généralement qu'une diminution de plus de 50 % du pic de force sur 3 répétitions permet de déterminer qu'une personne est localement fatiguée [35,36]. La mesure de force est possible à l'aide d'un dynamomètre, mais ne l'est pas en utilisant la chaussure de déstabilisation utilisée lors de cette étude. L'utilisation d'un dynamomètre est généralement chronophage et coûteuse et, par conséquent, est plus difficilement accessible en pratique clinique. Au contraire, le test de fatigue avec la chaussure de déstabilisation présente un coût modéré et semble plus adapté à une pratique clinique courante.

LIMITES DE L'ÉTUDE

Nous devons rester vigilants quant à l'interprétation de nos résultats, car la taille de notre échantillon reste limitée.

CONCLUSION

Le test de résistance à la fatigue musculaire du mouvement d'inversion/éversion avec la chaussure de déstabilisation présente une très bonne reproductibilité chez les sujets sains et une reproductibilité modérée chez les sujets CAI. Cependant, les résultats doivent être interprétés prudemment, car il semble probable qu'une incapacité motrice à la réalisation du mouvement sans lien avec de la fatigue soit à l'origine de l'arrêt du test chez certains sujets, en particulier dans la population CAI. L'absence de corrélation entre le score de résistance à la fatigue et la force musculaire isométrique des éverseurs et des dorsifléchisseurs met en avant la complexité de l'instabilité chronique de cheville et l'implication d'un ensemble de caractéristiques neuromusculaires.

Le score du test de fatigue reste cependant significativement plus faible chez les sujets CAI que chez les sujets sains mettant en avant l'intérêt d'un tel test pour l'évaluation clinique et la prise en charge courante de patients après une entorse latérale de cheville. Nos résultats ont mis en évidence qu'un score supérieur ou égal à 8 répétitions devait être attendu lors de ce test chez un sujet sain.

Remerciements

Merci à Mme Amand L. et M. Hallais E. pour leur aide dans la collection des données. Les auteurs remercient également la Fédération Wallonie-Brussels et le Centre d'Aide à la Performance Sportive (CAPS) pour leur support.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] Fong DTP, Hong Y, Chan LK, Yung PSH, Chan KM. A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports. *Sports Med* 2007;37(1):73–94.
- [2] Waterman BR, Owens BD, Davey S, Zacchilli MA, Belmont PJ. The epidemiology of ankle sprains in the United States. *J Bone Jt Surg* 2010;92(13):2279–84.
- [3] Wright IC, Neptune RR, Van Den Bogert AJ, Nigg BM. The influence of foot positioning on ankle sprains. *J Biomech*

2000;33 (5):513–9.

- [4] Willems T, Witvrouw E, Delbaere K, De Cock A, De Clercq D. Relationship between gait biomechanics and inversion sprains: A prospective study of risk factors. *Gait Posture* 2005;21(4):379–87.
- [5] Kobayashi T, Tanaka M, Shida M. Intrinsic risk factors of lateral ankle sprain: A systematic review and meta-analysis. *Sports Health* 2016;8(2):190–3.
- [6] Delahunt E, Remus A. Risk factors for lateral ankle sprains and chronic ankle instability. *J Athl Train* 2019;54(6):611–6.
- [7] Doherty C, Bleakley C, Hertel J, Caulfield B, Ryan J, Delahunt E. Recovery from a first-time lateral ankle sprain and the predictors of chronic ankle instability: a prospective cohort analysis. *Am J Sports Med* 2016;44(4):995–1003.
- [8] Hertel J, Corbett RO. An updated model of chronic ankle instability. *J Athl Train* 2019;54(6):572–88.
- [9] Golditz T, Steib S, Pfeifer K, Uder M, Gelse K, Janka R, et al. Functional ankle instability as a risk factor for osteoarthritis: using T2-mapping to analyze early cartilage degeneration in the ankle joint of young athletes. *Osteoarthr Cartil* 2014;22(10):1377–85.
- [10] Gabbett TJ. Incidence, site, and nature of injuries in amateur rugby league over three consecutive seasons. *Br J Sports Med* 2000;34(2):98–103.
- [11] Woods C, Hawkins R, Hulse M, Hodson A. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football: an analysis of ankle sprains. *Br J Sports Med* 2003;37:233–8.
- [12] Pinto M, Kuhn JE, Greenfield VH, Lou M, Hawkins RJ. Prospective analysis of ice hockey injuries at the junior level over the course of one season. *Clin J Sport Med* 1999;9(2):70–4.
- [13] Verschueren J, Tassignon B, De Pauw K, Proost M, Teugels A, Van Cutsem J, et al. Does acute fatigue negatively affect intrinsic risk factors of the lower extremity injury risk profile? A systematic and critical review. *Sports Med* 2020;50(4):767–84.
- [14] Johnston RB, Howard ME, Cawley PW, Losse GM. Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30(12):1703–7.
- [15] Mohammadi F, Roozdar A. Effects of fatigue due to contraction of evertor muscles on the ankle joint position sense in male soccer players. *Am J Sports Med* 2010;38(4):824–8.
- [16] Booth FW, Thomason DB. Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: Perspectives of various models. *Physiol Rev* 1991;71(2):541–85.
- [17] Knicker AJ, Renshaw I, Oldham ARH, Cairns SP. Interactive processes link the multiple symptoms of fatigue in sport competition. *Sports Med* 2011;41(4):307–28.
- [18] Terrier R, Forestier N. Quels tests en pratique clinique quoti-dienne pour diagnostiquer les déficits fonctionnels associés à l'instabilité chronique de cheville? Intérêts du dispositif Myolux. *Main À Pâte* 2015;7:275–9.
- [19] Hiller CE, Refshaug KM, Bundy AC, Herbert RD, Kilbreath SL. The cumberland ankle instability tool: a report of

validity and reliability testing. *Arch Phys Med Rehabil* 2006;87(9):1235–41.

- [20] Geerinck A, Beudart C, Salvan Q, Van Beveren J, D'Hooghe P, Bruyère O, et al. French translation and validation of the Cumberland Ankle Instability Tool, an instrument for measuring functional ankle instability. *Foot Ankle Surg* 2020;26(4):391–7.
- [21] Docherty CL, Gansneder BM, Arnold BL. Development and reliability of the ankle instability instrument. *J Athl Train* 2006;41 (2):154–8.
- [22] Locquet M, Benhotman B, Bornheim S, Van Beveren J, D'Hooghe P, Bruyère O, et al. The "Ankle Instability Instrument": cross-cultural adaptation and validation in French. *Foot Ankle Surg* 2021;27(1):70–6.
- [23] Forestier N, Terrier R. Peroneal reaction time measurement in unipodal stance for two different destabilization axes. *Clin Bio-mech* 2011;26(7):766–71.
- [24] Hall EA, Docherty CL, Simon J, Kingma JJ, Klossner JC. Strength-training protocols to improve deficits in participants with chronic ankle instability: a randomized controlled trial. *J Athl Train* 2015;50(1):36–44.
- [25] Fermanian J. Validation des échelles d'évaluation en médecine physique et de réadaptation: comment apprécier correctement leurs qualités psychométriques. *Ann Réadapt Médecine Phys* 2005;48(6):281–7.
- [26] Weir JP. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *J Strength Cond Res* 2005;19(1):231–40.
- [27] Riemann BL, Lininger MR. Statistical primer for athletic trainers: the essentials of understanding measures of reliability and minimal important change. *J Athl Train* 2018;53(1):98–103.
- [28] Green S. Measurement of anaerobic work capacities in humans. *Sports Med* 1995;19(1):32–42.
- [29] Hertel J. Sensorimotor Deficits with Ankle Sprains and Chronic Ankle Instability. *Clin Sports Med*. 2008;27(3):353–370. *Sports Med* 2008;27(3):353–70.
- [30] Delahunt E, Bleakley CM, Bossard DS, et al. Clinical assessment of acute lateral ankle sprain injuries (ROAST): 2019 consensus statement and recommendations of the International Ankle Consortium. *Br J Sports Med* 2018;52(20):1304–10.
- [31] Vuurberg G, Hoorntje A, Wink LM, et al. Diagnosis, treatment and prevention of ankle sprains: update of an evidence-based clinical guideline. *Br J Sports Med* 2018;52(15):956.
- [32] Hébert-Losier K, Wessman C, Alricsson M, Svantesson U. Updated reliability and normative values for the standing heel-rise test in healthy adults. *Physiotherapy* 2017;103(4):446–52.
- [33] Fousekis K, Tsepis E, Vagenas G. Intrinsic Risk factors of noncontact ankle sprains in soccer: a prospective study on 100 professional players. *Am J Sports Med* 2012;40(8):1842–50.
- [34] Silbernagel KG, Nilsson-Helander K, Thomeé R, Eriksson BI, Karlsson J. A new measurement of heel-rise endurance with the ability to detect functional deficits in patients with Achilles tendon rupture. *Knee Surg Sports*

Traumatol Arthrosc 2010;18(2):258– 64.

- [35] Gribble PA, Hertel J. *Effect of lower-extremity muscle fatigue on postural control. Arch Phys Med Rehabil* 2004;85(4):589–92.
- [36] Gutierrez GM, Jackson ND, Dorr KA, Margiotta SE, Kaminski TW. *Effect of fatigue on neuromuscular function at the ankle. J Sport Rehabil* 2007;16(4):295–306.