

# Isocinétisme et cheville : bilans, rééducation et prévention en traumatologie

François Fourchet

URCA, Université de Reims-Champagne, France

Reçu le 13 juin 2013 – Accepté le 27 juin 2013

**Résumé.** Le recours aux dynamomètres isocinétiques est devenu fréquent au niveau de la cheville tant en évaluation qu'en prévention et en rééducation, sans bien sûr se substituer aux techniques classiques de bilan et de réhabilitation. Des protocoles existent pour deux mouvements du complexe pied-cheville : la flexion plantaire/dorsale d'une part et l'inversion/éversion d'autre part. Pour une bonne compréhension et une utilisation efficace de l'outil isocinétique au niveau de la cheville, il est primordial de s'appropriier les termes usuels inhérents à l'isocinétisme en général tels que pic de couple, travail ou ratio agoniste/antagoniste. Pour chacun des mouvements, différentes positions possibles pour le sujet sont décrites (en variant notamment l'angle de flexion du genou) et de nombreux protocoles (en rapport avec les différentes marques de machines et critères spécifiques à évaluer) sont rapportés dans la littérature. Les paramètres majeurs tels que la vitesse, le nombre de répétitions ou les temps de récupération sont rappelés. Des indications précises existent pour l'isocinétisme au niveau de la cheville en préventif ainsi qu'en curatif. Le traitement des pathologies musculo-tendineuses du complexe suro-achilléen en mode excentrique est l'indication majeure d'usage de l'isocinétisme en flexion dorsale/plantaire. La prévention et la rééducation des entorses et des instabilités de cheville sont les principales occasions d'utiliser cet outil dans le mouvement d'inversion/éversion. Il est rappelé que cet outil trouve toute sa place auprès des adolescents et que les évaluations de la fatigue musculaire sont d'un grand intérêt en prévention des blessures de surmenage liées à la pratique sportive intensive.

**Mots clés :** Muscle, fatigue, instabilité, mollet, adolescent, sport, entorse

**Abstract. Isokinetic and ankle: assessment, rehabilitation and prevention in traumatology.**

The use of isokinetic dynamometers has become very common at the ankle joint level in prevention, evaluation and rehabilitation; of course without replacing the traditional assessment and treatment techniques. Protocols exist for two movements at the ankle-foot region: plantar/dorsal flexion and inversion/eversion. For a better understanding and an effective use of isokinetic tool at the ankle, it is essential to master the common terms usually associated with isokinetic such as peak torque, work or agonist/antagonist ratio. For each of the different possible movements the subject positions are described (in particular, varying the angle of knee flexion) and several protocols (in relation with the different brands of machines and specific evaluation criteria) are reported in the literature. The major parameters such as speed, number of repetitions or recovery time are recalled. Specific indications exist for isokinetic use at the ankle in prevention and treatment. The treatment of triceps and Achilles damaged structures in eccentric mode is the major indication for the use of isokinetic in dorsal/plantar flexion. Prevention and rehabilitation of ankle sprains and ankle instability are major indications to use this tool in inversion/eversion. It is worth noting as well that isokinetic can be applied among adolescent athletes and that assessments of muscle fatigue is of great interest in preventing overuse injuries related to intensive sport practice.

**Key words:** Muscle, fatigue, instability, calf, adolescent, sport, sprain

## 1 Introduction

Le complexe articulaire pied/cheville assure la transmission des contraintes et permet l'adaptation du pied au sol. Toute atteinte de ce système risque potentiellement de se répercuter sur l'ensemble. L'importance de cette interface entre le sol et le reste du corps est telle que tous les moyens doivent être mis en œuvre pour prévenir et/ou traiter ses traumatismes potentiels. L'isocinétisme est, parmi de nombreux autres, un des « outils » à utiliser pour aborder au mieux ces problématiques.

Le recours aux dynamomètres isocinétiques est certes devenu très fréquent au niveau du genou, mais force est de constater que cette technologie est également largement utilisée pour d'autres complexes articulaires, aux premiers rangs desquels l'épaule et la cheville. Cette dernière articulation arrive d'ailleurs à la deuxième place derrière le genou, mais avant l'épaule si l'on considère les publications indexées dans Pubmed sur le sujet (2308, 453 et 400 articles référencés pour le genou, la cheville et l'épaule respectivement) au 1<sup>er</sup> mai 2013. Bien évidemment, comme pour les autres articulations, les techniques isocinétiques d'évaluation ou de renforcement musculaires appliquées à la cheville ne se substituent pas aux techniques classiques de bilan et de rééducation, mais elles sont d'un grand intérêt tant en préventif qu'en curatif. Encore faut-il d'abord s'approprier un minimum de termes usuels inhérents à l'isocinétisme. Ensuite, l'évaluation et le renforcement des effecteurs de cheville, moins « normalisés » que ceux des effecteurs du genou se pratiquent autour de deux mouvements : flexions plantaire / dorsale d'une part et inversion / éversion d'autre part. Pour chacun de ces mouvements, il existe plusieurs positions possibles pour le sujet et un nombre important de protocoles dans la littérature (notamment eu égard aux différentes marques de machines). Il apparaît important de bien décrire ces positionnements et ces protocoles afin que l'utilisateur puisse tester/réduquer au plus près des besoins réels de son sujet. Ceci étant éclairci, le thème des principales indications et utilisations de l'isocinétisme au niveau de la cheville peut être abordé, que ce soit en prévention ou en traitement, en considérant la force ou la résistance à la fatigue, chez l'adulte ou chez le jeune.

## 2 Définitions usuelles (Pichard, 2009)

- Moment de force maximum (M.F.M.) ou pic de couple (*peak torque*) : Niveau le plus haut de la courbe. Il correspond à la force maximale produite. Il est exprimé en Newton-mètre (N.M).
- Moment de force maximum sur poids du corps (M.F.M./P.D.C) (*peak torque on body mass/weight*) : Rapport en pourcentage du M.F.M au P.D.C.
- Angle du M.F.M (*peak torque angle or angle at peak torque*) : Angle auquel est enregistré le M.F.M.
- M.F.M. à x degrés : M.F.M. enregistré au passage à l'angle demandé par l'opérateur.

- Temps d'accélération : Temps mis par le sujet pour rattraper la vitesse prédéterminée.
- Travail (*Work*) : Calcul informatique du produit de la force par le déplacement. Il est exprimé en Joules (J). Il représente la surface sous la courbe d'enregistrement.
- Puissance (*Power*) : Expression du travail par unité de temps. Il est exprimé en Watts (W).
- Charge d'accélération (T.A.E.) : Exprime la réponse explosive de la musculature. Travail (en J) calculé pendant les premiers centièmes de seconde du mouvement.
- Déviation standard : Mesure la variation des enregistrements de part et d'autre de l'enregistrement moyen.
- Ratio agonistes/antagonistes : Mesure le rapport des résultats du groupe de muscles théoriquement le plus faible sur ceux du groupe le plus fort.
- Pourcentage de déficit ou d'asymétrie : Comparaison en pourcentage entre le côté pathologique et le côté sain.
- Pourcentage de progrès : Comparaison en pourcentage entre un premier test de référence et un second test.
- Ratio d'endurance : Calcul informatique de la capacité à maintenir un effort dynamique prolongé (indice de fatigue).
- Courbe maximum : Pour « n » répétitions, la traduction de la courbe tracée à partir des points les plus forts de chaque courbe (reconstitution virtuelle).
- Courbe moyenne : Tracé de la courbe représentant les points moyens (reconstitution virtuelle).

## 3 Fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville

L'articulation talo-crurale permet les mouvements dans le plan sagittal (la flexion dorsale et la flexion plantaire du pied). Elle représente l'unité articulaire entre le squelette de la jambe et celui du pied. C'est une trochléenne de type mortaise. La stabilisation de cette articulation est assurée par plusieurs facteurs :

- Passive = les ligaments latéraux et sa structure d'emboîtement osseux ;
- Active = les haubans musculaires.

Les amplitudes de cette articulation sont en moyenne comprises entre 20° et 30° pour la flexion dorsale et 30° à 60° pour la flexion plantaire, mais sont variables en fonction du sexe, de l'âge, de l'activité et d'autres facteurs comme la génétique (laxité...).

L'articulation talo-crurale ne permet de bouger le pied que dans le plan sagittal. Lors de la marche, le pied doit s'adapter aux irrégularités du sol, c'est la raison d'être des autres articulations du pied.

### 3.1 Positionnement du sujet, réglages et paramètres

L'évaluation des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville peut se pratiquer dans trois positions différentes : en décubitus dorsal genou tendu, en décubitus dorsal genou fléchi ou en procubitus genou tendu. Le choix de la position de test est crucial. Les tests peuvent se dérouler pieds nus ou bien en chaussures ; dans ce cas, préférer des chaussures à semelle peu épaisse (type tennis ou sports en salle) plutôt que des chaussures de course à pied.

#### 3.1.1 Décubitus dorsal genou tendu (Fig. 1)

En théorie, les gastrocnemii sont sollicités au maximum et les valeurs de flexion plantaire sont maximales.

Bon contrôle visuel du sujet et facilité de communication avec celui-ci.

En général, le sujet est totalement couché mais l'inclinaison du siège à 50°–60° est possible pour assurer un bon appui du talon dans l'adaptateur et minimiser le soulèvement du talon pendant la flexion plantaire. Ceci permet ainsi d'obtenir un pic de couple correspondant à l'angulation réelle enregistrée. Le pied, le tronc, le bassin et la cuisse sont fixés par des sangles. L'axe de rotation du dynamomètre correspond à l'axe des malléoles (à savoir 10° de rotation et 10° d'inclinaison du dynamomètre par rapport au plan horizontal). La position anatomique neutre dans le plan sagittal détermine le zéro absolu (en général de 0 à 10° de flexion plantaire) (Ribeiro, 2012).

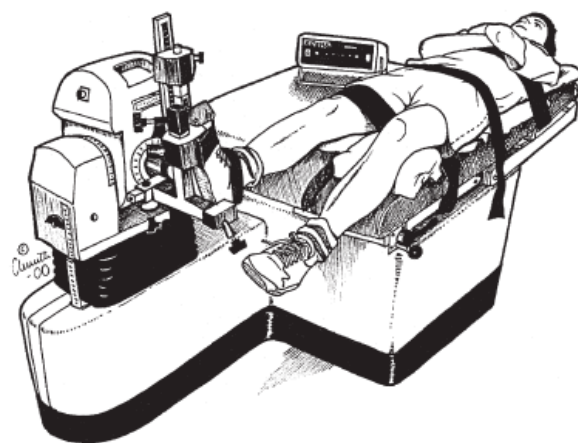
L'amplitude articulaire la plus souvent utilisée dans la littérature est de 20° de flexion plantaire et 10° de flexion dorsale. C'est également ce que nous utilisons dans notre pratique quotidienne car ce débattement est suffisant pour obtenir des valeurs fiables, mais pas excessif pour ne pas empêcher le bon démarrage d'une contraction excentrique maximale.

#### 3.1.2 Décubitus dorsal genou fléchi (Fig. 2)

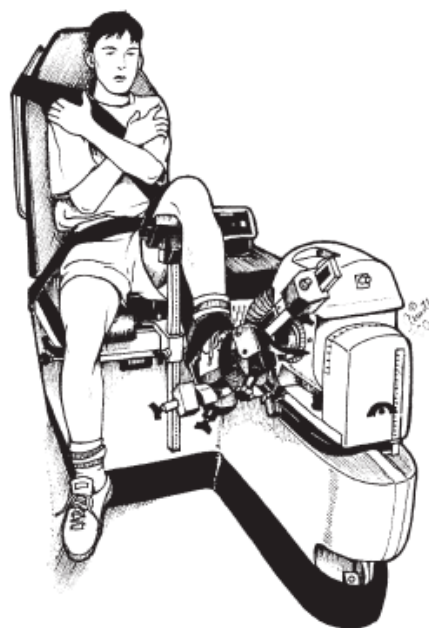
En théorie, les gastrocnemii ne sont pas sollicités au maximum et les valeurs de flexion plantaire ne sont pas maximales dans cette position. Cependant, au regard des dernières recherches, ceci est certainement vrai à 90° de flexion de genou, mais peut-être pas si évident à des angles inférieurs. Hebert-Losier *et al.* ont en effet récemment rapporté que l'angle de flexion du genou n'influait pas les paramètres de fatigue du triceps sural (non pas en chaîne ouverte isocinétique mais en chaîne fermée debout), avec un recrutement proportionnellement similaire des muscles soleus et gastrocnemius à 0° et 45° de flexion de genou (Hebert-Losier, Schneiders, Garcia, Sullivan, & Simoneau, 2012).

#### 3.1.3 Procubitus genou tendu (Fig. 3)

Cette position qui est la moins pratiquée des trois, présente le gros désavantage de « cacher » le visage du



**Fig. 1.** Position du sujet en décubitus dorsal genou tendu pour une évaluation isocinétique des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville (d'après Moller, Lind, Styf, & Karlsson, 2005).



**Fig. 2.** Position du sujet en décubitus dorsal, siège relevé, genou fléchi pour une évaluation isocinétique des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville (d'après Moller, *et al.*, 2005).

sujet, ce qui peut nuire au bon déroulement de la séance ou du test. Elle est en général choisie par défaut.

### 3.2 Évaluation

Une fois le positionnement du sujet effectué, il est temps de passer à l'évaluation proprement dite. Quelques détails restent néanmoins à régler avant de commencer. Tout d'abord la correction de la gravité est un facteur



**Fig. 3.** Position du sujet en procubitus, genou fléchi pour une évaluation isocinétique des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville.

important à ne pas omettre. Même si cela est bien sûr moins crucial au niveau de la cheville que du genou par exemple, ne pas tenir compte de cette correction conduit à :

- modifier l'allure de la courbe de force,
- sous-estimer la force réelle du groupe musculaire travaillant contre la gravité,
- surestimer la force réelle du groupe musculaire travaillant avec l'aide de la gravité,
- changer la proportion de chaque groupe musculaire dans les calculs de ratios.

En pratique, la prise en compte directe sur le dynamomètre du poids du membre est la règle. Il existe sur les dynamomètres récents un mode de correction de la gravité qu'il faut activer avant le début du test. Ensuite, il est important de fixer certaines « règles du jeu », comme la position des poignées pour que le sujet se tienne et qui devra être reproduite pour toutes les évaluations et la possibilité ou non d'encourager verbalement le sujet pendant le test. En pratique quotidienne, nous choisissons personnellement toujours d'encourager les sujets lors des évaluations.

Le début de l'évaluation se fera par une séquence d'entraînement spécifique que l'on nomme la familiarisation. Bien qu'elle ne soit malheureusement pas toujours généralisée, elle est importante, surtout en mode excentrique pour les fléchisseurs plantaires. Elle permet de vérifier également que le sujet a bien compris les consignes et ne souffre d'aucune douleur dans le mouvement spécifique du test. En général, trois à huit répétitions sous-maximales puis une à trois répétitions maximales sont conseillées (Burnett, Betts, & King, 1990; De Ste Croix, Deighan, & Armstrong, 2003; Perrin, 1993). Nous pratiquons pour notre part deux séries de

six contractions en modes concentrique et en excentrique, dont les deux dernières sont maximales.

Le choix des vitesses d'évaluation est l'un des critères clés d'un bon test isocinétique. En ce qui concerne les tests de force des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville, nous utilisons, à titre personnel, les vitesses de  $60^{\circ} \cdot s^{-1}$  et  $120^{\circ} \cdot s^{-1}$  lorsque nous testons à deux vitesses différentes et  $90^{\circ} \cdot s^{-1}$  lorsque nous ne testons qu'une seule vitesse. Il existe différentes raisons à ce choix :

- Ce sont les vitesses moyennes qui font référence dans la littérature (Dvir, 2004; Fourchet, *et al.*, 2012, 2013; Salavati, Moghadam, Ebrahimi, & Arab, 2007; Webber & Porter, 2010).
- En pratiques, les vitesses plus élevées sont difficiles à « suivre » pour les sujets et ne présentent finalement pas un grand apport clinique.
- Des vitesses trop lentes au niveau des fléchisseurs dorsaux conduisent plus facilement à la survenue de crampes.

Le ratio agoniste-antagoniste (classique/conventionnel ou fonctionnel) est très utilisé au niveau du genou et de l'épaule, ou bien de la cheville mais dans les mouvements d'éversion-inversion. Il est moins utilisé au niveau des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville. Les opérateurs préfèrent souvent comparer chaque groupe musculaire avec le côté opposé ou avec des évaluations antérieures. Néanmoins, il existe dans la littérature des valeurs de référence du ratio fléchisseurs dorsaux sur fléchisseurs plantaires oscillant entre 0,28 à 0,30 (à  $30^{\circ} \cdot s^{-1}$  en concentrique), 0,23 à 0,36 (à  $60^{\circ} \cdot s^{-1}$  en concentrique) (Ribeiro, 2012; So, Siu, Chan, Chin, & Li, 1994). Cependant certaines études font état de ratios s'échelonnant de 0,28 à 0,66 en concentrique à différentes vitesses (Alexander, 1990; Calmels, Nellen, van der Borne, Jourdin, & Minaire, 1997; Gerodimos, Manou, Stavropoulos, Kellis, & Kellis, 2006; So, *et al.*, 1994).

La reproductibilité des évaluations isocinétique des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville est rapportée comme dépendant assez peu de la position choisie et se situant de 0,55 à 0,98 selon les auteurs (Holmback, Porter, Downham, & Lexell, 1999; Moller, *et al.*, 2005; Morrison & Kaminski, 2007).

Dans notre pratique quotidienne, nous notons des coefficients de variation 9 % à 11 % pour les fléchisseurs plantaires et légèrement supérieurs 10 à 12 % pour les fléchisseurs dorsaux.

### 3.3 Renforcement – rééducation – pathologies

La rééducation isocinétique des muscles mobilisant la cheville dans le plan sagittal trouve toute sa place essentiellement dans les suites de lésions musculaire ou tendineuse (opérées ou non). Le travail en mode excentrique des fléchisseurs plantaires est un outil thérapeutique intéressant pour traiter notamment les tendinopathies



d'Achille chroniques ou les cicatrices fibreuses au niveau du triceps (Brown, 2000; Yu, Park, & Lee, 2013). Les protocoles de renforcement utilisés sont toujours dérivés de la théorie de Stanish datant du milieu des années 1980 (Stanish, Rubinovich, & Curwin, 1986).

Les grands principes sont les suivants :

- De une à trois séries de 15 répétitions en excentrique à vitesse lente (au départ), chaque jour ou même deux fois par jour dans certains protocoles plus agressifs, cinq à sept jours par semaine.
- Alternier les positions genou fléchi et genou tendu sur le dynamomètre.
- Accepter la douleur (surtout la douleur retardée après la séance) si elle est inférieure à 3–5/10 – le fameux « *no pain – no gain* ».
- La phase d'attaque du protocole dure de six à douze semaines. Des séances d'entretien peuvent être proposées jusqu'à 18 mois. . .
- Augmenter progressivement la vitesse et le nombre de répétitions.

Ces protocoles peuvent bien sûr être réalisés également sans dynamomètre isocinétique et notamment en chaînes fermée, debout, comme dans la version initiale. L'usage de l'outil isocinétique permet néanmoins de parfaitement quantifier/maîtriser la charge de travail, de travailler en toute sécurité (résistance asservie) et d'obtenir un retour du travail en temps réel via l'écran pour déceler d'éventuels arcs douloureux. Les séances sont donc parfaitement reproductibles et la progression s'en trouve améliorée.

Bien que les lésions chroniques constituent probablement la première indication d'usage de l'isocinétisme, certains protocoles sont appliqués avec succès en clinique sur des lésions fraîches voire même aiguës du mollet – en utilisant notamment des vitesses extrêmement faibles (de l'ordre de  $5^\circ \cdot s^{-1}$ ) en mode « arthromoteur excentrique » dans les premiers jours post-lésionnels. Il est alors demandé au patient de résister à la flexion dorsale du levier sans ressentir de douleur vive.

Une remarque importante ici : il a été montré depuis plus de 10 ans que le fait de posséder un pied plat flexible ou hyper pronateur induisait une moins bonne transmission de la force générée par les fléchisseurs plantaires vers le dynamomètre (déperdition de force au niveau du pied manquant de rigidité). Ceci justifie sans doute l'usage de chaussures pour les tests et la rééducation dans ce cas. *A contrario*, les sujets hyper pronateurs sont connus pour être plus faibles au niveau des fléchisseurs plantaires que leurs pairs à pied dits normaux (Snook, 2001).

L'évaluation et la rééducation isocinétiques des fléchisseurs plantaires et dorsaux sont également impliqués dans la rééducation des instabilités de cheville mais ceci sera abordé plus loin dans ce chapitre.

## 4 Inverseurs et éverseurs du pied

Les mouvements d'inversion et d'éversion sont générés au niveau de deux articulations de l'arrière-pied : l'articulation sub-talaire et l'articulation de Chopart. Ces mouvements sont complexes et réalisés autour de l'axe de Henke qui est oblique de haut en bas, de dedans en dehors et d'avant en arrière. Cet axe virtuel résulte de la fusion de trois axes (flexion-extension, abduction-adduction, pronosupination).

L'inversion est le mouvement qui associe une extension, une adduction et une supination : il porte la pointe du pied en bas, en avant et en dedans. L'éversion est le mouvement qui associe une flexion, une abduction et une pronation : il porte la partie externe du pied en haut, en dehors et en arrière.

La position de zéro anatomique pour ces mouvements est articulation talo-crurale à  $90^\circ$ .

Il n'existe pas d'amplitude exacte pour ce mouvement combiné mais la littérature rapporte fréquemment des valeurs allant de  $25^\circ$  à  $30^\circ$  pour l'inversion et de  $10^\circ$  à  $20^\circ$  pour l'éversion.

Les principaux muscles moteurs de l'inversion sont le tibial postérieur, le long fléchisseur des orteils et le long fléchisseur de l'Hallux.

Les principaux muscles moteurs de l'éversion sont les muscles fibulaires, le long extenseur des orteils et le 3<sup>e</sup> fibulaire.

### 4.1 Positionnement du sujet, réglages et paramètres

Tout comme pour les fléchisseurs plantaires et dorsaux, le choix de la position du test est important. Si le genou est placé en extension, les ischio-jambiers sont neutralisés, ce qui élimine en théorie les mouvements de rotations tibiales (Osternig, Bates, & James, 1980; Van Cingel, van Melick, van Doren, & Aufdemkampe, 2009). Cependant, il faut bien noter que des compensations sont alors possibles en rotation à l'étage sus-jacent (la hanche), malgré les différentes fixations (Fig. 4).

À l'heure actuelle, la grande majorité des utilisateurs placent le sujet en décubitus dorsal avec le genou fléchi à un angle variable suivant les opérateurs et les dynamomètres (Edouard, *et al.*, 2011). Cette position genou fléchi, augmente probablement artificiellement la force enregistrée en inversion et éversion à cause d'une participation des ischio-jambiers : une rotation médiale-latérale du segment jambier s'additionnant au mouvement d'inversion-éversion (Lentell, Cashman, Shiomoto, & Spry, 1988; Van Cingel, *et al.*, 2009). Cependant, cette position étant de loin la plus utilisée en pratique clinique, elle permet les comparaisons avec d'autres études. En outre, cette position genou fléchi a été démontré comme fournissant des résultats plus reproductibles (Amaral De Noronha & Borges, 2004; Dvir, 2004; Hartsell &



**Fig. 4.** Position du sujet en décubitus dorsal, siège relevé, genou tendu pour une évaluation isocinétique des inverseurs et éverseurs du pied (d'après Van Cingel, *et al.*, 2009).



**Fig. 5.** Position du sujet en décubitus dorsal genou tendu pour une évaluation isocinétique des inverseurs et éverseurs du pied (d'après Edouard, *et al.*, 2011).

Spaulding, 1999; Van Cingel, *et al.*, 2009). À titre personnel, nous réalisons le test avec une flexion de genou de 30 à 40° pour des raisons pratiques et de confort (Fig. 5).

Tout aussi important est le choix du degré de flexion plantaire. Elle oscille suivant les opérateurs et les études entre 0° et 10°. La position à 0° de flexion semble démontrer parfois une meilleure reproductibilité (Aydog, Aydog, Cakci, & Doral, 2004), parfois non (Cawthorn, Cummings, Walker, & Donatelli, 1991; Van Cingel, *et al.*, 2009) tandis que la position en flexion plantaire à 10° augmente le pic de couple (Ribeiro, 2012; Tourné, Besse, & Mabit, 2010) : certains résultats sont contradictoires dans la littérature à ce sujet.

Il faut néanmoins bien rappeler que le mouvement d'inversion-éversion est un mouvement combiné autour de plusieurs axes instantanés et qu'à ce titre, le positionnement sur dynamomètre isocinétique ne correspondra

jamais parfaitement à la réalité fonctionnelle (Dvir, 2004; Edouard, *et al.*, 2011; Van Cingel, *et al.*, 2009).

Le débattement articulaire est rarement rapporté dans la littérature lors d'expérimentations sur les mouvements d'inversion/éversion. Dans notre pratique quotidienne, nous utilisons en règle générale une butée à 20° en inversion et à 10° en éversion. La position neutre de référence est cheville à 90° dans la talo-crurale. Ce débattement est suffisant pour obtenir des valeurs fiables, mais pas excessif pour ne pas empêcher le bon démarrage d'une contraction excentrique maximale, en fin d'amplitude d'inversion ou d'éversion.

## 4.2 Évaluation

Nous ne reviendrons pas ici sur certains critères ou certaines recommandations déjà mentionnés dans le chapitre consacré aux flexions dorsale et plantaire et auquel le lecteur peut se reporter.

Tout comme pour les flexions plantaire et dorsale précédemment, le début de l'évaluation se fera par une séquence d'échauffement spécifique que l'on nomme la familiarisation. Nous recommandons pour notre part deux séries de six contractions en mode concentrique (à 60°.s<sup>-1</sup> et 120°.s<sup>-1</sup> composées de trois répétitions sous-maximales et de trois répétitions maximales chacune) et d'une série de six contractions en mode excentrique (à 90°.s<sup>-1</sup> composée également de trois répétitions sous-maximales et de trois répétitions maximales).

En ce qui concerne les vitesses d'évaluation, c'est bien entendu un critère important. Un consensus assez large existe sur l'utilisation de vitesses égales à 30°.s<sup>-1</sup> et 120°.s<sup>-1</sup> qui présentent l'avantage de permettre une très bonne reproductibilité (Amaral De Noronha & Borges, 2004; Karnofel, Wilkinson, & Lentell, 1989; Lin, Liu, Hsieh, & Lee, 2009; Van Cingel, *et al.*, 2009; Wilkerson, Pinerola, & Caturano, 1997).

Lors de l'analyse des résultats, l'étude du ratio agoniste/antagoniste (ici éverseurs/inverseurs) est important pour le mouvement d'éversion/inversion. En fonction des vitesses, ce ratio est compris en concentrique entre 0,63 et 0,92, c'est-à-dire inférieur à 1 (Amaral De Noronha & Borges, 2004; Edouard, *et al.*, 2011; Lin, *et al.*, 2009; Wilkerson, *et al.*, 1997); le ratio augmentant lorsque la vitesse diminue. Il est possible qu'à cause de spécificités liées à la pratique de certains sports comme l'athlétisme, ce ratio s'inverse (Edouard, *et al.*, 2011). Pour mémoire, d'autres ratios sont décrits dans la littérature, comme par exemple le ratio divisant le pic de couple concentrique par le pic de couple excentrique pour la même fonction (par exemple éverseurs en excentrique sur éverseurs en concentrique) (Hartsell & Spaulding, 1999). Ce ratio semble présenter un intérêt dans la prise en charge des instabilités chroniques de cheville, avec une « capacité » des muscles éverseurs et inverseurs diminuée en mode excentrique. Un autre ratio, plus fonctionnel, (à l'instar de celui

considérant les ischio-jambiers en excentrique sur le quadriceps en concentrique au niveau du genou) a également été proposé il y a une dizaine d'années (Yildiz, *et al.*, 2003). Ce ratio semble être relativement bien utilisé en clinique par les praticiens mais fut peu repris au niveau de la recherche (ce ratio sera mentionné dans la partie de ce chapitre consacrée à la pathologie).

### 4.3 Renforcement – rééducation – pathologies

La rééducation des entorses de cheville et la prévention secondaire des instabilités chroniques sont certainement les indications les plus fréquentes de l'utilisation d'un dynamomètre isocinétique au niveau de la cheville. Celle-ci prend habituellement la forme d'un renforcement des éverseurs et des inverseurs, en concentrique et en excentrique, à vitesses lentes et rapides, en force et en résistance à la fatigue.

De nombreux protocoles sont utilisés et disponibles. À titre d'exemple, suite à une entorse du ligament collatéral latéral de la cheville, traitée conservativement, le renforcement des inverseurs-éverseurs en concentrique à  $60^\circ \cdot s^{-1}$  et  $120^\circ \cdot s^{-1}$  doit être proposé. En fonction de l'avancement du traitement et du niveau sportif du patient, trois à huit séries de cinq à 10 répétitions devront être effectuées. Le renforcement en mode excentrique devra être débuté dès que possible en fonction des capacités du patient et des courbatures induites. En pratique, nous limitons toujours le nombre de répétitions à 30 en mode excentrique, avec des séries courtes de cinq à six répétitions en début de progression et pouvant aller jusque 10 répétitions (dans ce cas trois séries de 10 répétitions) lorsque le patient est en fin de progression. Dans leur étude de 2003, Yildiz, *et al.*, (2003) soulignaient déjà la nécessité du renforcement en excentrique des éverseurs surtout en fin d'amplitude d'inversion, s'appuyant sur un ratio éverseurs en excentrique/inverseurs en concentrique beaucoup plus faible chez les sujets souffrant d'instabilité.

Il est néanmoins important de signaler ici que le renforcement des éverseurs (aussi efficace soit-il) ne suffit pas à prévenir la récurrence, qui malheureusement conduira trop souvent à l'instabilité fonctionnelle ou chronique de cheville. La rééducation proprioceptive basée sur la théorie du « *feed-forward* » ou « anticipation » reste une composante majeure de ce traitement. Nous pourrions résumer ainsi notre propos : le renforcement des éverseurs est une condition nécessaire mais pas suffisante pour une bonne rééducation de la cheville traumatique ou instable ; ceci étant très bien synthétisé dans une récente revue de littérature montrant que le risque d'entorse de cheville était lié à plusieurs facteurs comme une stabilité posturale altérée, des éverseurs faibles en excentrique à vitesse lente ou des fléchisseurs plantaires trop forts par rapports aux fléchisseurs dorsaux en concentrique à vitesse rapide (Witchalls, Blanch, Waddington, & Adams, 2012). C'est sans doute la raison pour laquelle

les résultats sont si controversés dans la littérature dès lors que l'on cherche à répondre à la question : *Est-ce que renforcer les éverseurs va réduire le risque de récurrence ou d'instabilité ?* Une partie des études montrant un déficit de force significatif des éverseurs chez les sujets à cheville instable (Hartsell & Spaulding, 1999; Negahban *et al.*, 2013; Yildiz, *et al.*, 2003) et d'autres études n'en retrouvant aucun (Bernier, Perrin, & Rijke, 1997; Fox, Docherty, Schrader, & Applegate, 2008; Kaminski, Perrin, & Gansnedter, 1999; Negahban, *et al.*, 2013). Il faut donc aussi considérer d'autres facteurs comme le rôle crucial des inverseurs dans la stabilisation de la cheville : ces muscles sont à renforcer absolument en modes concentrique mais surtout excentrique. Deux études sont à citer pour justifier la place centrale des inverseurs. Munn, Beard, Refshauge, et Lee, (2003) proposent un mécanisme alternatif pour expliquer l'entorse de cheville : le déport du centre de gravité vers l'extérieur provoque une eversion du pied en chaîne fermée, à laquelle les inverseurs sont censés résister. S'ils ne remplissent pas correctement et rapidement cette tâche, le levier devient trop important vers l'extérieur et la cheville bascule en inversion forcée. D'autre part, David, Halimi, Mora, Doutrelot, et Petitjean (2013) ont récemment rapporté, données électromyographiques à l'appui, que non seulement le renforcement des éverseurs mais aussi celui des inverseurs devaient constituer une priorité dans la prise en charge des instabilités de chevilles. D'autre part, au moins deux autres études traitant de la survenue d'entorses de cheville et de l'instabilité de cheville ont retrouvé une insuffisance significative des fléchisseurs dorsaux chez les sujets concernés (Naicker, McLean, Esterhuizen, & Peters-Futre, 2007; Negahban, *et al.*, 2013). Les auteurs expliquent ces résultats par le mécanisme lésionnel le plus courant, à savoir adduction + une composante de flexion plantaire qui implique une prévention axée certes sur les éverseurs mais aussi sur les fléchisseurs dorsaux. Cette constatation ne surprendra pas les kinésithérapeutes du sport qui ne manquent pas de faire leur contentions de cheville en position neutre de la talo-crurale à  $90^\circ$  en limitant la flexion plantaire.

Il est important de mentionner ici que les déficits identifiés lors d'une évaluation isocinétique peuvent être dus à une lésion nerveuse, particulièrement en cas de traumatisme aigu comme une entorse de cheville. Il a été rapporté récemment que dans 6 % des entorses (spécialement stade II et III), une lésion histologique du nerf fibulaire était présente (Nitz, 2012).

## 5 Prévention : évaluation de la fatigue en isocinétisme

Il existe de nombreuses possibilités de travailler sur la prévention des blessures de la jambe et de la cheville grâce à l'isocinétisme, comme le suivi régulier de l'évolution de la force des mollets ou du ratio

fléchisseurs dorsaux sur plantaires par exemple. Un peu moins connue est l'évaluation de l'endurance ou plus exactement de la résistance à la fatigue (fatigabilité). Ce thème est pourtant de premier intérêt tant l'endurance de force est importante notamment chez les coureurs de loisir ou de compétition; particulièrement au moment où la « mode » des chaussures minimalistes et de la course pieds-nus bat son plein. Il est désormais bien rapporté dans la littérature que ce mode de course à pied induit un transfert de charge des pièces osseuses du complexe pied-cheville vers les structures musculo-tendineuses postérieures du pied et de la jambe, nécessitant donc une préparation adéquate de ces structures.

Les protocoles isocinétiques destinés à mesurer la résistance à la fatigue des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville sont basés sur des séries de nombreuses répétitions maximales (de 30 à 50 en général) enchaînées à des vitesses précises (Bisson, Remaud, Boyas, Lajoie, & Bilodeau, 2012; Boyas, *et al.*, 2011; Dipla, *et al.*, 2009; Fourchet, *et al.*, 2012, 2013; Harkins, Mattacola, Uhl, Malone, & McCrory, 2005). Plusieurs formules peuvent être appliquées en vue de calculer un indice de fatigue :

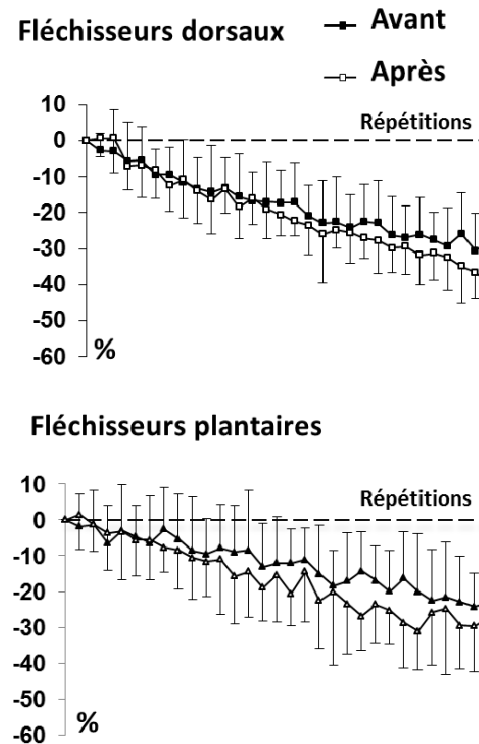
- comparer les trois premières et les trois dernières répétitions de la série,
- évaluer le nombre de répétitions nécessaires avant que la force développée ne tombe sous la barre des 50 % ou des 30 % de la force initiale,
- calculer un indice de résistance à la fatigue suivant la formule suivante (Bosquet, *et al.*, 2010) :

$$\text{Indice de fatigue} = (100 \times (\text{total PdC} \div \text{idéal PdC})) - 100$$

où Total PdC = Somme des pics de couple sur 30 ou 50 contractions.

Idéal PdC = nombre de contractions  $\times$  meilleur PdC.

Suivant cette méthode d'évaluation et de calcul, il est intéressant de tester la fatigabilité (sur 30 répétitions en concentrique) des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville chez de jeunes coureurs de demi-fond avant et après une épreuve de course jusqu'à l'épuisement à 95 % de la vitesse maximale aérobie sur tapis roulant (Fourchet, *et al.*, 2012, 2013). Les résultats de cette étude que nous avons conduite, ont montré que les fléchisseurs plantaires avaient une résistance à la fatigue réduite en état de fatigue (indice de fatigue : +29,7 %,  $p < 0,05$ ), contrairement aux fléchisseurs dorsaux (indice de fatigue : +17,3 %,  $p > 0,05$ ) (Fig. 6). Ces changements n'affectant que les fléchisseurs plantaires sont en accord avec les résultats d'études antérieures consacrées à la fatigue des fléchisseurs plantaires chez les adultes sur courtes ou longues distances. (Saldanha, Nordlund Ekblom, & Thorstensson, 2008; Weist, Eils, & Rosenbaum, 2004). Il semble en effet que la perte de force du triceps (consécutivement à la fatigue) puisse être un facteur d'augmentation de la pronation en raison du site d'insertion de ce groupe musculaire distalement ainsi



**Fig. 6.** Diminution de la force concentrique au niveau des fléchisseurs plantaires et dorsaux de cheville sur 30 répétitions avant et après une épreuve de course jusqu'à l'épuisement.

que par diminution de l'effet « poutre-composite » de la chaîne distale postérieure et plantaire. Ce déséquilibre entre fléchisseurs plantaires et dorsaux de la cheville pourrait compromettre le rôle protecteur de ces muscles et conduire à un risque accru de pathologies de surmenage.

Il est important de souligner que les vitesses sont spécifiques pour ce genre d'évaluations longues et fatigantes avec une vitesse plus lente pour les fléchisseurs plantaires ( $30^\circ \cdot s^{-1}$ ) que pour les fléchisseurs dorsaux ( $120^\circ \cdot s^{-1}$ ). La raison de cette disparité est 1) de faire atteindre le même niveau de fatigue à des moments relativement proches à ces deux groupes musculaires malgré leur caractéristiques très différentes (Bisson, *et al.*, 2012; Boyas, *et al.*, 2011; Fourchet, *et al.*, 2012, 2013) et 2) d'éviter la survenue prématurée de crampes au niveau des fléchisseurs dorsaux.

## 6 Spécificités d'une population en isocinétisme : les enfants/adolescents

L'isocinétisme utilisé sur les enfants et les adolescents ne doit pas faire peur. C'est un outil asservi d'évaluation et de renforcement qui compte parmi les plus fiables et les plus sûrs (Burnie & Brodie, 1986; De Ste Croix, *et al.*, 2003; Osternig, 1986). Il apparaît simplement que les indications soient plus restreintes chez les jeunes que



chez les adultes ; ce qui revient à toujours bien se poser la question préalable de l'utilité d'un test analytique isocinétique de force maximale ou d'une rééducation de même nature à un âge où il est bien connu que les tests et les réentraînements fonctionnels sont particulièrement recommandés.

Il existe cependant des indications bien réelles pour l'utilisation des dynamomètres isocinétiques et plusieurs études ont montré que les enfants pouvaient être évalués de manière fiable en utilisant les modes concentrique et excentrique (De Ste Croix, 2007 ; De Ste Croix, *et al.*, 2003 ; Fourchet, *et al.*, 2012, 2013). Le suivi du développement de la force pendant la puberté chez les adolescents sportifs est notamment un sujet riche d'enseignement mais encore incomplet. La littérature disponible sur le sujet indique que le développement de la force associé à l'âge est attribuable aux changements liés à la croissance et la maturation et que les différences entre filles et garçons apparaissent aux alentours de 14 ans. En outre, la taille et la masse corporelle semblent constituer des variables importantes pour expliquer le développement de la force musculaire, alors que la période du « pic de croissance » est considérée comme un moment particulièrement important pour les gains maximaux en force pendant l'enfance ; ces gains étant très probablement engendrés majoritairement par l'augmentation du bras de levier des muscles (De Ste Croix, 2007).

Afin d'utiliser au mieux l'outil isocinétique au niveau de la cheville chez les jeunes, certaines adaptations doivent être opérées sur le dynamomètre avant de l'utiliser, comme pour les autres articulations. Voici quelques-unes des principales spécificités à prendre en compte. Nous recommandons à cet effet la lecture de la revue de littérature publiée par De Ste Croix (De Ste Croix, *et al.*, 2003) pour de plus amples détails.

## 6.1 Familiarisation

Bien qu'elle ne soit pas encore généralisée, la familiarisation est primordiale chez les jeunes, surtout en mode excentrique. À la suite de l'échauffement général, trois à huit répétitions sous-maximales puis une à trois répétitions maximales sont conseillées (Burnett, *et al.*, 1990 ; De Ste Croix, *et al.*, 2003 ; De Ste Croix, Armstrong, Welsman, & Sharpe, 2002 ; Perrin, 1993).

*Protocole* : Les protocoles de type « continu » sont plus indiqués chez les jeunes dépourvus d'expérience avec l'isocinétisme (avec notamment suffisamment de temps de coupure entre la flexion plantaire et la flexion dorsale) (Docherty & Gaul, 1991). En évaluation, deux à six répétitions sont en général recommandées pour les adultes ; rien de définitif n'est prescrit à cet égard pour les jeunes dans la littérature mais un nombre légèrement plus élevé de répétitions aux vitesses rapides semble indiqué.

## 6.2 Vitesse

Il semble que les mouvements effectués à des vitesses supérieures à  $120^{\circ} \cdot s^{-1}$  soient difficiles à exécuter correctement et de manière reproductible par des jeunes, particulièrement sans familiarisation et sans entraînement préalable. Il est recommandé dans ce cas de débiter par les vitesses lentes afin de s'assurer que les consignes sont bien comprises. À terme et avec des jeunes plus expérimentés, des vitesses de  $5^{\circ} \cdot s^{-1}$  à  $240^{\circ} \cdot s^{-1}$  peuvent être utilisées sans problème comme chez l'adulte (Burnie & Brodie, 1986 ; De Ste Croix, *et al.*, 2003 ; Osternig, 1986).

## 6.3 Temps de repos

Les temps de repos doivent être suffisants entre chaque vitesse testée. Avec la population adulte, on estime que 30 à 60 s sont nécessaires après quatre répétitions maximales (Perrin, 1993). Ce temps de récupération entre les séries dépend bien sûr de la population, de l'articulation et de la vitesse spécifique, et varie de 30 s à 5 min (Kellis, Kellis, & Gerodimos, 1999). La majorité des études chez les enfants préconisent 1–2 min de repos entre les séries (De Ste Croix, 2007 ; De Ste Croix, *et al.*, 2002, 2003). Notre expérience personnelle nous a amené à opter pour une récupération de 90 s, même en cas de sollicitation en mode excentrique.

## 6.4 Correction de la gravité

En pratique, la prise en compte directe sur le dynamomètre du poids du membre est ardue chez les jeunes car il leur est souvent difficile de bien se détendre. Il faut donc prévoir suffisamment de temps pour cette opération. Une solution alternative consiste à utiliser des données anthropométriques afin de prendre en compte le poids du membre (De Ste Croix, *et al.*, 2003).

## 6.5 Accélération/décélération

Etant donné que les périodes d'accélération et de décélération sont plus longues à des vitesses plus élevées, il est très important d'examiner les articulations sur une grande amplitude de mouvement, surtout chez les enfants qui génèrent de petits couples et ont donc parfois du mal à « suivre » le mouvement du levier (De Ste Croix, *et al.*, 2002, 2003).

## 6.6 Mode excentrique

Il est possible que le manque de données dans la littérature à propos des capacités excentrique des enfants soit dû à un éventuel risque plus élevé de blessure

musculaire ou de courbatures. Cependant, il n'existe aucune justification scientifique claire à ce sujet ; il faudra bien sûr veiller à ce que les enfants aient effectué suffisamment d'échauffement et de familiarisation avant toute évaluation.

### 6.7 Reproductibilité / fiabilité

Il a été suggéré qu'un coefficient de variation ne dépassant pas  $\sim 6,1\%$  et une corrélation intra-classe (ICC) supérieure ou égale à  $\sim 0,88$ , assurent d'une bonne fiabilité des tests en isocinétisme chez les jeunes (De Ste Croix, *et al.*, 2003 ; Perrin, 1993). On peut considérer que dans la même session l'écart entre deux mesures ne doit pas dépasser  $\sim 8\%$ , et  $\sim 12\%$  entre deux sessions à plusieurs jours d'écart. Si les écarts sont au-dessus de cette fourchette la validité des mesures peut être considérée comme douteuse. Cependant, il est possible d'obtenir une bonne fiabilité de mesures isocinétiques, même avec de très jeunes sujets (De Ste Croix, *et al.*, 2003).

### 6.8 Dominance

Les asymétries de force musculaire entre membres dominant et non-dominant sont susceptibles d'être moins prononcées chez les enfants que chez les adultes. C'est sans doute lorsque les enfants deviennent plus spécialisés et plus expérimentés dans leurs activités que ces différences peuvent se développer (Burnie & Brodie, 1986).

### 6.9 Résultats sur des tests d'endurance musculaire

Au cours de tests d'endurance/résistance à la fatigue, les enfants-adolescents semblent être en mesure de mieux maintenir la force que les adultes (au niveau du genou). Les mécanismes de cette différence restent à déterminer mais sont sans doute généralisables au niveau de la cheville. Ils ont été attribués 1) à la répartition et au recrutement des fibres de type II, 2) à la moindre dépendance au métabolisme glycolytique, 3) à l'élimination plus rapide des déchets métaboliques et 4) aux valeurs des pics de couple initiaux plus élevées chez les adultes (De Ste Croix, *et al.*, 2003).

## 7 Conclusion

L'outil isocinétique présente un grand intérêt dans la prise en charge des patients présentant des pathologies du pied et de la cheville (aspect curatif) comme dans la prévention des déséquilibres musculaires pouvant potentiellement engendrer des pathologies (aspect préventif). Le traitement des lésions musculaires et tendineuses chroniques, la rééducation des entorses de cheville et la lutte

contre la récurrence dans les instabilités constituent les principales indications. Cet outil aussi sûr que fiable peut être utilisé sans restriction particulière chez l'enfant et l'adolescent si l'indication est bien posée. L'utilisation de cet appareillage coûteux et très spécialisé requiert toutefois un minimum d'expérience et de pratique, qui amèneront le clinicien à interpréter correctement mais humblement les résultats afin de proposer des protocoles s'intégrant en bonne place dans l'arsenal thérapeutique déjà à sa disposition.

## Bibliographie

- Alexander, M.J. (1990). Peak torque values for antagonist muscle groups and concentric and eccentric contraction types for elite sprinters. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 71 (5), 334–339.
- Amaral De Noronha, M., & Borges, N.G., Jr. (2004). Lateral ankle sprain: isokinetic test reliability and comparison between invertors and evertors. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 19 (8), 868–871.
- Aydog, E., Aydog, S.T., Cakci, A., & Doral, M.N. (2004). Reliability of isokinetic ankle inversion- and eversion-strength measurement in neutral foot position, using the Biodex dynamometer. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 12 (5), 478–481.
- Bernier, J.N., Perrin, D.H., & Rijke, A. (1997). Effect of unilateral functional instability of the ankle on postural sway and inversion and eversion strength. *Journal of Athletic Training*, 32 (3), 226–232.
- Bisson, E.J., Remaud, A., Boyas, S., Lajoie, Y., & Bilodeau, M. (2012). Effects of fatiguing isometric and isokinetic ankle exercises on postural control while standing on firm and compliant surfaces. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 9, 39.
- Bosquet, L., Maquet, D., Forthomme, B., Nowak, N., Lehance, C., & Croisier, J.L. (2010). Effect of the lengthening of the protocol on the reliability of muscle fatigue indicators. *International Journal of Sports Medicine*, 31 (2), 82–88.
- Boyas, S., Remaud, A., Bisson, E.J., Cadieux, S., Morel, B., & Bilodeau, M. (2011). Impairment in postural control is greater when ankle plantarflexors and dorsiflexors are fatigued simultaneously than when fatigued separately. *Gait & Posture*, 34 (2), 254–259.
- Brown, L.E. (2000). *Isokinetics in Human Performance*. Champaign, IL : Human Kinetics.
- Burnett, C.N., Betts, E.F., & King, W.M. (1990). Reliability of isokinetic measurements of hip muscle torque in young boys. *Physical Therapy*, 70 (4), 244–249.
- Burnie, J., & Brodie, D.A. (1986). Isokinetic measurement in preadolescent males. *International Journal of Sports Medicine*, 7 (4), 205–209.
- Calmels, P.M., Nellen, M., van der Borne, I., Jourdin, P., & Minaire, P. (1997). Concentric and eccentric isokinetic assessment of flexor-extensor torque ratios at the hip,

- knee, and ankle in a sample population of healthy subjects. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78 (11), 1224–1230.
- Cawthorn, M., Cummings, G.S., Walker, J.R., & Donatelli, R.A. (1991). Isokinetic measurement of foot invertor and evertor force in three positions of plantarflexion and dorsiflexion. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 14 (2), 75–81.
- David, P., Halimi, M., Mora, I., Doutrelot, P.L., & Petitjean, M. (2013). Isokinetic testing of evertor and invertor muscles in patients with chronic ankle instability. *Journal of Applied Biomechanics*, in press.
- De Ste Croix, M. (2007). Advances in paediatric strength assessment: changing our perspective on strength development. *Journal of Sports Science and Medicine* 6, 292–304.
- De Ste Croix, M., Deighan, M., & Armstrong, N. (2003). Assessment and interpretation of isokinetic muscle strength during growth and maturation. *Sports Medicine*, 33 (10), 727–743.
- De Ste Croix, M.B., Armstrong, N., Welsman, J.R., & Sharpe, P. (2002). Longitudinal changes in isokinetic leg strength in 10-14-year-olds. *Annals of Human Biology*, 29 (1), 50–62.
- Dipla, K., Tzirini, T., Zafeiridis, A., Manou, V., Dalamitros, A., Kellis, E., et al. (2009). Fatigue resistance during high-intensity intermittent exercise from childhood to adulthood in males and females. *European Journal of Applied Physiology*, 106 (5), 645–653.
- Docherty, D., & Gaul, C.A. (1991). Relationship of body size, physique, and composition to physical performance in young boys and girls. *International Journal of Sports Medicine*, 12 (6), 525–532.
- Dvir, Z. (2004). *Isokinetics: Muscle Testing, Interpretation, and Clinical Applications* (2nd ed.) Tel-Aviv: Churchill Livingstone.
- Edouard, P., C.J., Fourchet, F., Collado, H., Degache, F., Leclair, A., Rimaud, D., & Calmels, P. (2011). Invertor and Evertor Strength in Track and Field Athletes with Functional Ankle Instability. *Isokinetics and Exercise Science*, 19, 91–96.
- Fourchet, F., Kelly, L., Horobeanu, C., Loepelt, H., Taiar, R., & Millet, G.P. (2013). Impact of high intensity running on plantar flexor fatigability and plantar pressure distribution in adolescent runners. *Journal of Athletic Training*, In press.
- Fourchet, F., Millet, G.P., Tomazin, K., Guex, K., Nosaka, K., Edouard, P., Degache, F., & Millet, G.Y. (2012). Effects of a 5-h hilly running on ankle plantar and dorsal flexor force and fatigability. *European Journal of Applied Physiology*, 112 (7), 2645–2652.
- Fox, J., Docherty, C.L., Schrader, J., & Applegate, T. (2008). Eccentric plantar-flexor torque deficits in participants with functional ankle instability. *Journal of Athletic Training*, 43 (1), 51–54.
- Gerodimos, V., Manou, V., Stavropoulos, N., Kellis, E., & Kellis, S. (2006). Agonist and antagonist strength of ankle musculature in basketball players aged 12 to 17 years. *Isokinetics and Exercise Science*, 14, 81–89.
- Harkins, K.M., Mattacola, C.G., Uhl, T.L., Malone, T.R., & McCrory, J.L. (2005). Effects of 2 ankle fatigue models on the duration of postural stability dysfunction. *Journal of Athletic Training*, 40 (3), 191–194.
- Hartsell, H.D., & Spaulding, S.J. (1999). Eccentric/concentric ratios at selected velocities for the invertor and evertor muscles of the chronically unstable ankle. *Br J Sports Medicine*, 33 (4), 255–258.
- Hebert-Losier, K., Schneiders, A.G., Garcia, J.A., Sullivan, S.J., & Simoneau, G.G. (2012). Influence of knee flexion angle and age on triceps surae muscle activity during heel raises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26 (11), 3124–3133.
- Holmback, A.M., Porter, M.M., Downham, D., & Lexell, J. (1999). Reliability of isokinetic ankle dorsiflexor strength measurements in healthy young men and women. *Scandinavian Journal of Rehabilitative Medicine*, 31 (4), 229–239.
- Kaminski, T.W., Perrin, D.H., & Gansneder, B.M. (1999). Eversion strength analysis of uninjured and functionally unstable ankles. *Journal of Athletic Training*, 34 (3), 239–245.
- Karnofel, H., Wilkinson, K., & Lentell, G. (1989). Reliability of isokinetic muscle testing at the ankle. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 11 (4), 150–154.
- Kellis, E., Kellis, S., & Gerodimos, V. (1999). Reliability of isokinetic concentric and eccentric strength in circumpubertal soccer players. *Pediatric Exercise Science*, 11, 218–228.
- Lentell, G., Cashman, P.A., Shiimoto, K.J., & Spry, J.T. (1988). The effect of knee position on torque output during inversion and eversion movements at the ankle. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 10 (5), 177–183.
- Lin, W.H., Liu, Y.F., Hsieh, C.C., & Lee, A.J. (2009). Ankle eversion to inversion strength ratio and static balance control in the dominant and non-dominant limbs of young adults. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12 (1), 42–49.
- Moller, M., Lind, K., Styf, J., & Karlsson, J. (2005). The reliability of isokinetic testing of the ankle joint and a heel-raise test for endurance. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 13 (1), 60–71.
- Morrison, K.E., & Kaminski, T.W. (2007). The reproducibility of an isokinetic testing technique at the ankle joint. *Isokinetics and Exercise Science*, 15, 245–251.
- Munn, J., Beard, D.J., Refshauge, K.M., & Lee, R.Y. (2003). Eccentric muscle strength in functional ankle instability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35 (2), 245–250.
- Naicker, M., McLean, M., Esterhuizen, T.M., & Peters-Futre, E.M. (2007). Poor peak dorsiflexor torque associated with incidence of ankle injury in elite field female hockey players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10 (6), 363–371.

- Negahban, H., Moradi-Bousari, A., Naghibi, S., Sarrafzadeh, J., Shaterzadeh-Yazdi, M.J., Goharpey, S., Eremadi, M., Mazaheri, M., & Feizi, A. (2013). The eccentric torque production capacity of the ankle, knee, and hip muscle groups in patients with unilateral chronic ankle instability. *Asian Journal of Sports Medicine*, 4 (2), 114–152.
- Nitz, A. (2012). Neurogenic responses to ankle sprains. Paper presented at the Fifth International Ankle Symposium. Lexington (KY).
- Osternig, L.R. (1986). Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 14, 45–80.
- Osternig, L.R., Bates, B.T., & James, S.L. (1980). Patterns of tibial rotary torque in knees of healthy subjects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12 (3), 195–199.
- Perrin, D. (1993). *Isokinetic exercise and assessment*. Champaign (IL): Human Kinetics.
- Pichard, G. (2009). *Le travail isocinétique : Les principes, l'évaluation, le renforcement, la rééducation*. Reims : Institut de Formation en Masso-Kinesithérapie.
- Ribeiro, C. (2012). *Évaluation du profil isocinétique des instabilités chroniques de cheville*. Sports Medicine Master thesis. University of Lille, France, Lille (France).
- Salavati, M., Moghadam, M., Ebrahimi, I., & Arab, A.M. (2007). Changes in postural stability with fatigue of lower extremity frontal and sagittal plane movers. *Gait & Posture*, 26 (2), 214–218.
- Saldanha, A., Nordlund Ekblom, M.M., & Thorstensson, A. (2008). Central fatigue affects plantar flexor strength after prolonged running. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 18 (3), 383–388.
- Snook, A.G. (2001). The relationship between excessive pronation as measured by navicular drop and isokinetic strength of the ankle musculature. *Foot Ankle International*, 22 (3), 234–240.
- So, C.H., Siu, T.O., Chan, K.M., Chin, M.K., & Li, C.T. (1994). Isokinetic profile of dorsiflexors and plantar flexors of the ankle – a comparative study of elite versus untrained subjects. *British Journal of Sports Medicine*, 28 (1), 25–30.
- Stanish, W.D., Rubinovich, R.M., & Curwin, S. (1986). Eccentric exercise in chronic tendinitis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 208, 65–68.
- Tourné, Y., Besse, J.L., & Mabit, C. (2010). L'instabilité chronique de cheville. Quel bilan lésionnel? Quelles solutions thérapeutiques. *Revue de chirurgie orthopédique et traumatologique*, 96, 503–518.
- van Cingel, R., van Melick, N., van Doren, L., & Aufdenkampe, G. (2009). Intra-examiner reproducibility of ankle inversion-eversion isokinetic strength in healthy subjects. *Isokinetics and Exercise Science*, 17, 181–188.
- Webber, S.C., & Porter, M.M. (2010). Reliability of ankle isometric, isotonic, and isokinetic strength and power testing in older women. *Physical Therapy*, 90 (8), 1165–1175.
- Weist, R., Eils, E., & Rosenbaum, D. (2004). The influence of muscle fatigue on electromyogram and plantar pressure patterns as an explanation for the incidence of metatarsal stress fractures. *American Journal of Sports Medicine*, 32 (8), 1893–1898.
- Wilkerson, G.B., Pinerola, J.J., & Caturano, R.W. (1997). Invertor vs. evertor peak torque and power deficiencies associated with lateral ankle ligament injury. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 26 (2), 78–86.
- Witchalls, J., Blanch, P., Waddington, G., & Adams, R. (2012). Intrinsic functional deficits associated with increased risk of ankle injuries: a systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 46 (7), 515–523.
- Yildiz, Y., Taner, A., Sekir, S., Hazneci, B., Komurcu, M., & Alp Kalyon, T. (2003). Peak and end range eccentric evertor/concentric invertor muscle strength ratios in chronically unstable ankles: comparison with healthy individuals. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2, 70–76.
- Yu, J., Park, D., & Lee, G. (2013). Effect of eccentric strengthening on pain, muscle strength, endurance, and functional fitness factors in male patients with achilles tendinopathy. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 92 (1), 68–76.