

MASTER STAPS
ENTRAINEMENT ET OPTIMISATION
DE LA PERFORMANCE SPORTIVE

ANNÉE UNIVERSITAIRE

2015 - 2016

**TITRE: ANALYSE DE LA RAIDEUR
MUSCULOTENDINEUSE CHEZ DES ATHLETES DE
DIFFÉRENTES ACTIVITÉS ET DE DIFFÉRENTS
NIVEAUX.**

PRÉSENTE PAR : KEVIN RUTARE

SOUS LA DIRECTION DE : P. CAMPILLO

SOUTENU LE 20/ 05 / 2016

DEVANT LE JURY :

F. DAUSSIN (RAPPORTEUR)

**Y. GÉRARD (TUTEUR DU
STAGE)**

T. BUYSSE (MEMBRE)

Y. NKADA (MEMBRE)

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Philippe CAMPILLO pour son investissement, sa disponibilité et ses conseils très précieux pour finaliser ce projet qui me tenait à cœur.

Je tiens à remercier Monsieur Yves GERARD, ancien entraîneur national de saut en hauteur et actuellement CTS et chargé de formation à la Ligue Nord Pas De Calais d'Athlétisme, pour la confiance qu'il a eu mon égard, pour la liberté qu'il m'a donnée lors de mes interventions, ainsi que les échanges quotidiens en matière de préparation physique.

Je tiens à remercier Monsieur Yves NKADA, entraîneur de saut en longueur et de triple saut au CREPS de Wattignies, pour m'avoir mis à disposition tous les résultats de ses athlètes.

Je tiens à remercier Monsieur Raymond CONZMIEUS, directeur du Sportlycée du Luxembourg, pour m'avoir permis d'effectuer les tests au sein de sa structure.

Je tiens à remercier la Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique de Ronchin, pour l'emprunt des ouvrages et du matériel, m'ayant permis de mener à bien mon stage.

Je tiens à remercier tous les entraîneurs qui ont mis à disposition leurs athlètes, pour me permettre de mener à bien mes tests.

Je tiens à remercier tous les athlètes pour leur motivation lors des tests effectués.

Je tiens à remercier toutes les personnes m'ayant aidé de près ou de loin à mettre en place ce mémoire.

Sommaire

Glossaire.....	3
Introduction.....	4
Revue de littérature.....	5
La raideur.....	5
La composante contractile.....	6
La composante élastique série.....	7
La composante élastique parallèle.....	7
Comment se comporte l'ensemble muscle tendon ?.....	8
Quelle est l'implication de la raideur dans la performance sportive.....	11
Raideur et analyse cinématique.....	11
Raideur et développement de la force.....	12
Raideur et coût énergétique.....	13
Raideur et prévention.....	13
La modification de la raideur par l'entraînement.....	14
L'effet de l'entraînement en musculation.....	14
L'effet d'un entraînement pliométrique.....	15
Problématique, objectifs et hypothèses.....	16
Le Stage.....	18
Description des structures.....	18
Centre de Ressources d'Expertise et de Performance Sportive de Wattignies.....	18
Sportlycée – Luxembourg.....	18
Sujets.....	19
Matériel.....	20
Protocole des tests.....	20
Analyse statistique.....	22
Résultats.....	22
Discussion.....	27
Valeur de la puissance.....	27
Valeur de la raideur.....	27
Relation entre la raideur et la puissance.....	29
Évaluation de la raideur.....	30
Conclusion.....	31
Perspectives.....	31
Références bibliographiques	33
Annexe.....	37
Résumé et mots-clés.....	47

Glossaire

A	Athlétisme
B	Basket-ball
CC	Composante contractile
CEP	Composante élastique parallèle
CES	Composante élastique série
CMJ	Counter Mouvement Jump
Hz	Hertz
IMC	Indice de masse corporelle
kg	kilogramme
kN.m ⁻¹	kilo newton par mètre
M	Masse
max	Maximal
ms	Millième de secondes
N.m ⁻¹	Newton par mètre
r	coefficient de corrélation
RJ	Rebound Jumps
RJM	Rebound Jump Maximal
RJSM	Rebound Jump Submaximal
SJ	Squat Jump
ss max	Sous maximal
Tc	Temps de contact
Tf ou Tv	Temps de vol
V	Volleyball
W	Watt
W.kg ⁻¹	Watt par kilogramme

Introduction

Lors de mon mémoire en Master 1, j'ai effectué un travail sur la planification de l'entraînement de la force dans le basketball. Dès le début, l'intention était d'établir un modèle de planification qui permette le développement des qualités physiques durant la saison, tout en respectant le calendrier imposé à l'équipe. Ayant eu des résultats et un retour positif du staff et des joueuses, j'ai voulu continuer à traiter sur des thèmes peu exploités jusqu'à présent.

C'est ainsi, que j'ai décidé de me lancer dans l'analyse de la raideur musculotendineuse, un concept qui est cher à mes yeux. En effet, fréquemment utilisé en athlétisme, la notion de raideur musculotendineuse est très souvent employée, sans réelle connaissance de la part des entraîneurs.

Lors de quelques déplacements à l'étranger, j'ai pu assister à plusieurs colloques durant lesquels la notion de raideur musculotendineuse a été abordée, ce qui a bien évidemment éveillé ma curiosité.

Il est inutile de débattre sur les qualités physiques nécessaires dans les différentes activités physiques. Si le Squat Jump et le Countermovement Jump sont très souvent utilisés afin de déterminer la force explosive et la capacité à restituer de l'énergie, les tests de rebonds s'effectuent souvent pour étoffer la batterie de tests, sans réellement connaître les qualités mesurées. Sur ce sujet, Cometti (2001) attribue la différence de performance entre le SJ et le CMJ non pas à l'effet pliométrique du CMJ mais uniquement à l'allongement du temps d'action ; une idée réfutée par de nombreuses études.

L'envie de traiter la raideur musculotendineuse dans mon mémoire de fin d'étude s'explique par la volonté d'obtenir grâce à la revue de littérature des connaissances pointues des facteurs agissant sur la raideur et le fonctionnement du corps humain lors d'un saut ou d'une course.

De plus les tests que nous allons effectuer sur le terrain vont nous permettre de comparer directement différents sportifs entre eux, ainsi que l'évolution de leur raideur sur une longue période.

En effet, si de nombreuses études ont analysé l'effet des différents types d'entraînements sur le complexe muscle-tendon, peu ont été celles, comparant différentes populations et notamment sur plusieurs cycles d'entraînement.

Ainsi, j'espère pouvoir répondre aux questions que les entraîneurs se posent sur le terrain.

Revue de littérature

La raideur

D'un point de vue littéraire, la raideur se définit par un manque de souplesse dans un mouvement ou une réaction. Ce terme se traduit en anglais par stiffness.

En analysant les propriétés mécaniques de la raideur, nous pouvons nous référer à la loi de Hooke et son constat « telle extension, telle force ». Selon cette loi, la déformation d'une structure est proportionnelle à la force appliquée sur celle-ci. Pour cela, il faut que l'objet en question soit élastique, c'est-à-dire qu'une fois les forces appliquées ont cessé d'agir, l'objet retrouve sa longueur initiale.

Prenons le cas d'un ressort linéaire idéal :

$$\Delta F = k \cdot \Delta L$$

Ainsi, la déformation ΔL est une fonction linéaire de la force ΔF , k étant la constante de raideur du ressort.

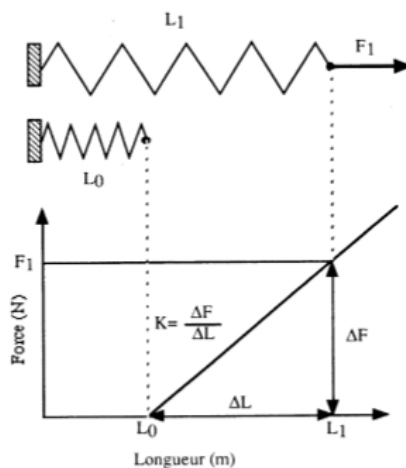


Figure 1 Modèle schématique de la raideur
(extrait Influence du contrôle de la raideur musculotendineuse lors de la locomotion ; G.Dalleau 1998)

Dans la figure 1 présentée ci-dessus nous pouvons comprendre plus facilement le principe de la raideur d'un point de vue mécanique. Pour prendre un exemple concret, en nous référant à la loi de Hooke, nous pouvons donc dire que, si nous multiplions par deux la force appliquée sur le ressort, l'allongement du ressort sera également multiplié par deux.

En voulant transférer ces principes vers un modèle mécanique du muscle, nous devons prendre en compte que le comportement mécanique du muscle est déterminé par trois

composantes fonctionnelles. Cela est également intéressant pour connaître par la suite ce qui se passe à l'intérieur du muscle lors d'un exercice.

Chapman (1985) parle de la composante contractile (CC), de la composante élastique en série

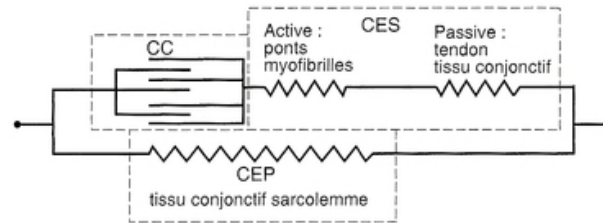


Figure 2 Structure tissulaire de la composante élastique (extrait de Biomécanique : Éléments de mécanique musculaire. F. Goubel et G. Lensele-Corbeil. 2003)

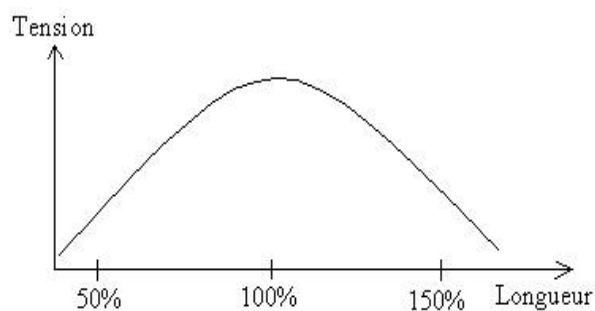
(CES) et de la composante élastique parallèle (CEP).

Composante contractile

La CC peut être qualifiée de générateur de force. D'un point de vue anatomique, elle correspond aux ponts d'actine-myosine, générant la force exercée par le muscle.

Cependant, la force générée par la CC est fort variable. En effet, pour le même niveau d'excitation, la force développée par le muscle dépend de la longueur et de la vitesse de contraction. La CC est donc dépendante de 2 relations.

D'une part, elle est caractérisée par la relation Force-Longueur. Cette relation peut être déterminée en analysant la modification musculaire lors d'une contraction isométrique.



Nous observons donc

Figure 3 Tension exercée par une fibre musculaire en fonction de sa longueur initiale (extrait de strapscrew.free.fr)

dans la figure 3 une

tension musculaire maximale lorsque le muscle se rapproche de sa longueur de repos et une diminution lorsque l'on s'en écarte, que ce soit en allongement ou en raccourcissement.

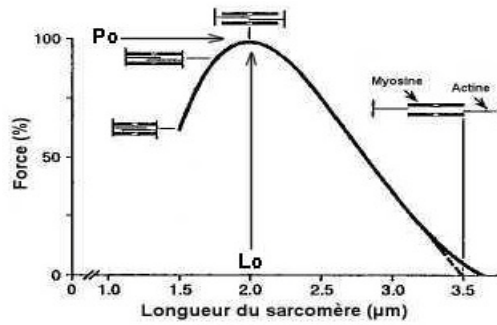


Figure 4 Force générée en fonction de la longueur initiale du sarcomère
(extrait de prevost.pascale.free.fr - théorie du muscle)

Dans la figure 4 nous notons que la force maximale est obtenue lorsque la longueur du sarcomère est proche de la longueur initiale (2-2.2 µm). A cette longueur, la capacité de chevauchement des filaments d'actine et de myosine est maximale, permettant ainsi une production de force plus importante. En s'écartant de cette longueur optimale la force générée par la fibre musculaire diminue.

D'autre part, elle est caractérisée par la relation Force-Vitesse (voir figure 5).

La Composante élastique en série

La CES peut être comparée à un ressort situé entre la composante contractile et les éléments osseux y étant associés. Elle est composée de deux éléments. Une partie active qui correspond aux capacités de liaisons des ponts actine-myosine et une partie passive qui se situe au niveau des fibres tendineuses. Cette dernière est qualifiée de passive, car elle ne dépend pas directement de l'activation musculaire.

D'une part, la CES va jouer un rôle pour transmettre les forces exercées par la CC vers les segments osseux. Une forte raideur de la CES va permettre une meilleure transmissions de force. En s'allongeant elle permet également d'avoir une fonction d'amortisseur pour protéger les segments osseux, notamment lors d'une contraction musculaire trop importante.

D'autre part, la CES va intervenir lors du stockage et la restitution de l'énergie élastique obtenue lors d'un cycle d'étirement-raccourcissement. En effet, lors de la phase frénatrice, la CES va stocker l'énergie qui sera ensuite restituée au moment de la contraction propulsive du muscle qui en suivra.

La Composante élastique Parallèle

La CEP est composée de gaines de tissu conjonctif qui permettent de maintenir les fibres musculaires, telles que les fascias, les aponévroses ou encore les enveloppes fibrillaires.

Il s'agit d'une structure qui, due à son élasticité, effectue une déformation réversible, en réponse à une contrainte. La raideur de la CEP peut varier en fonction des muscles analysés. Elle va dépendre de la densité des tissus conjonctifs présents dans le muscle et de leurs teneurs en collagène. En clair, un muscle avec des fibres musculaires courtes et une plus grande densité de membrane plasmique aura plus de tissu conjonctif et sera donc par conséquent plus raide.

Comment se comporte l'ensemble muscle-tendon ?

Lors d'une contraction isométrique, on obtient une modification de la longueur (L) par rapport à une force (F) exercée dans le muscle. Nous parlons donc de compliance musculaire, c'est-à-dire l'élasticité musculaire. Elle permet de déterminer la capacité d'étirement du muscle.

Cependant, Kubo et al. (2001) estiment que la raideur passive était indépendante de l'élasticité des structures tendineuses et n'a, toujours selon lui, aucune influence lors d'un cycle étirement raccourcissement. Lorsque le muscle est au repos, il effectue de légères tensions provenant des CES et CEP qui permettent ainsi de le maintenir à l'équilibre.

Cependant, lors d'une contraction, la CC devient génératrice de force et ce en condition statique ou en condition dynamique. La tension dite « active », exercée par la composante contractile n'est pas directement mesurable. Afin de la déterminer, il faut la calculer à travers la tension globale et la tension passive.

Tension active = Tension globale – Tension passive

Lors d'une contraction anisométrique, la force développée par le muscle sera dépendante des facteurs Force – Vitesse. En effet, la vitesse de contraction du muscle dépend de la force opposée à celui-ci.

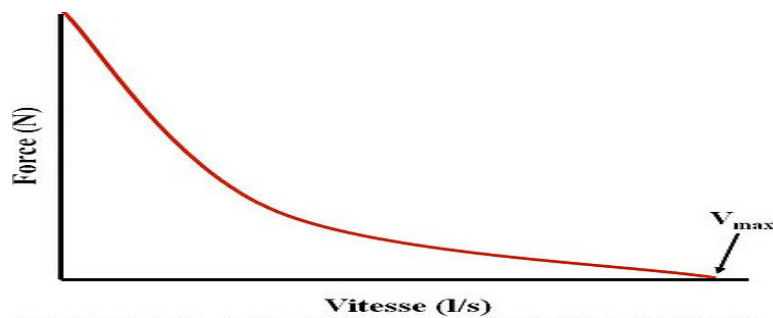


Figure 5 Force produite par une fibre musculaire en fonction de sa vitesse de contraction (d'après Randall, Burggen et Frence, 2002)

Dans la figure 5, nous pouvons observer une fonction illustrant la relation force-vitesse. Une augmentation de la vitesse de contraction va donc entraîner une diminution de la force produite par le corps musculaire.

La CES va donc jouer un rôle primordial lors de la transmission de ces forces. Nous pouvons dire que plus la CES est raide, meilleure peut être la transmission des forces. Cependant, la CES doit avoir une certaine souplesse afin d'exercer son rôle d'amortisseur (qui sert initialement à protéger les structures osseuses).

D'un point de vue de la performance, le rôle de la CES est important lorsqu'il s'agit de stocker et de restituer l'énergie lors d'une action pliométrique. Lorsque le muscle effectue un freinage ou une contraction excentrique (1^{ère} phase pliométrique) la CES stocke l'énergie élastique, qu'elle restituera ensuite lors de la contraction concentrique (2^{ème} phase pliométrique), qui aura un effet propulsif. Pour optimiser ce processus d'étirement-détente il faut prendre en compte différents éléments. D'une part, l'étirement de la CES doit être faible. D'autre part, le temps de passage entre la phase excentrique et concentrique doit être très bref. De nombreuses études ont conclu que l'efficacité d'un mouvement pliométrique est réduite, lorsque l'enchaînement étirement-contraction est trop long.

Thyus et al. (1972) ont mesuré la consommation d'oxygène afin de déterminer l'efficacité des rebonds avec un temps de latence de 1,5 s entre la phase excentrique et la phase concentrique.

L'efficacité était de 25,8 % pour les rebonds avec un temps de couplage court, contre 18,8% pour les sauts avec un temps de latence.

Aura et Komi (1987) ou encore Wilson, Elliott et Wood (1991) ont établi une fonction qui permet d'illustrer la perte d'énergie élastique en fonction des temps d'enchaînement du cycle

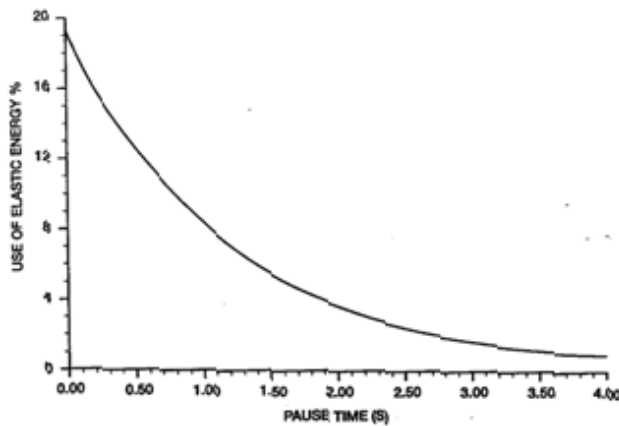


Figure 6 Utilisation de l'énergie élastique par rapport au temps de couplage étirement raccourcissement (selon Wilson, Elliott et Wood : 1990)

étirement-raccourcissement.

Dans la figure 6 nous pouvons mettre en évidence, qu'un délai d'1 s diminue le rendement élastique de plus de 50%.

En effet si l'amplitude du mouvement ou le temps de délai sont trop importants les ponts d'unions actine-myosine vont rompre et l'énergie sera dissipée en chaleur. De plus, sachant que l'augmentation de la concentration en calcium permettant la liaison actine-myosine ne dure que quelques millièmes de secondes, la transition étirement-raccourcissement doit être très brève, afin d'avoir le rendement le plus efficace possible.

Cependant, il ne faut pas oublier que lors de nombreux mouvements sportifs, le réflexe myotatique rentre en jeu. Également appelé réflexe ostéotendineux, ce mécanisme permet une contraction réflexe d'un muscle en réponse à son propre étirement. C'est un élément principal dans le maintien de la posture. Il a également une grande importance lors du cycle étirement-raccourcissement. Schmidbleicher (1985), montre que la force exercée lors d'un saut en contrebas est plus élevée que celle produite suite à une contraction maximale isométrique. La participation du réflexe myotatique servira donc pour optimiser les transmissions de force en réduisant le temps du cycle étirement raccourcissement.

Bosco et al. (1992) ont analysé l'action du mollet lors d'un saut avec et sans pré étirement de ce dernier. L'activité du muscle était mesurée par électromyographie. Tous les sujets avaient une activité musculaire supérieure lorsque le mollet avait été pré étiré. Ils en ont déduit, que la

différence s'explique par un gain, provenant à 72% de l'énergie élastique et 28% du réflexe myotatique.

Plus récemment, Erich et al. (2010) ont analysé si la durée de la phase freinatrice avait un rôle dans les transmissions des forces. Ils ont pu en conclure qu'une diminution du temps de freinage, donc de la phase excentrique, permet un meilleur transfert de force avec un gain de force concentrique, en l'occurrence, propulsive. Ainsi, on peut établir l'intérêt du réflexe myotatique dans la performance sportive.

Quelle est l'implication de la raideur dans la performance sportive ?

Les recherches dans ce domaine ont été très utiles pour l'analyse de la performance ainsi que pour l'optimisation de l'entraînement.

Wilson, Elliott et Wood (1991) ont calculé que le transfert de l'énergie élastique n'était efficace que jusqu'à 300 ms. C'est pour cela que lors des activités telles que le sprint, où le temps de contact au sol ne dure que 100 ms la raideur musculotendineuse intervient fortement.

Les entraîneurs et chercheurs se sont donc intéressés à analyser l'ensemble muscle-tendon, afin de déterminer la raideur musculotendineuse. En effet, celle-ci permettra d'absorber, de stocker et, finalement de restituer l'énergie.

Cependant, les avis de différents auteurs divergent très souvent. Cela débute avec l'opposition entre Cavagna et al. (1977) qui conclut qu'une raideur faible permet de mieux stocker et restituer l'énergie élastique, alors que récemment Secombe et al. (2015), après avoir analysé des sportifs de haut niveau ont conclu qu'une forte raideur musculotendineuse améliore la vitesse de développement de la force du sportif.

Raideur et analyse cinématique

En termes de performance, Chelly et Denis (2001) ont analysé une dizaine de sujets lors d'une accélération de 40 m. Ces résultats ont été comparés à la raideur des membres inférieurs obtenue grâce aux temps de contact et aux temps de vol effectués lors de sauts verticaux. Ils ont obtenu une corrélation significative entre la raideur des membres inférieurs et la vitesse maximale des sujets.

Lockie et al. (2015) a opposé l'analyse cinématique d'une accélération de 10 m à la raideur des membres inférieurs. Ils n'ont trouvé aucune corrélation entre la capacité d'accélération et la raideur des sujets analysés. Cela peut s'expliquer par le fait que lors de la phase

d'accélération, les temps de contact sont relativement longs, ce qui empêche une implication de la raideur musculotendineuse. Bret et al. (2002) avait poussé son analyse plus loin en comparant la raideur à la capacité d'accélération, la vitesse maximale et la décélération lors d'un 100 m. Il en conclut que les athlètes avec une plus grande raideur des membres inférieurs étaient capables de continuer à accélérer entre les 30 m et 60 m, ce qui diminue la distance de décélération. De plus, il note que le groupe avec la raideur la plus élevée était capable d'atteindre la vitesse de course la plus élevée.

Raideur et développement de la force

Dalleau et al. (2007) ont comparé la puissance musculaire et la raideur de différents athlètes. Pour cela, il a effectué des tests de rebonds sur un public de haut niveau, composé de 28 sprinteurs et 29 skieurs. Il en a conclu que « la puissance lors du test de rebonds maximaux semble être liée à la raideur des membres inférieurs uniquement chez des sujets entraînés à produire de la puissance dans les mêmes conditions ». La corrélation entre la puissance et la raideur était uniquement obtenue dans le groupe des sprinteurs et non dans le groupe des skieurs. Ainsi, la mesure de la raideur doit être prise en tant que test spécifique dans certains groupes d'athlètes.

Selon Bojsen et al. (2005) la vitesse de développement de la force est corrélée à la raideur des éléments tendineux. Pour cela, il a analysé le complexe muscle tendon du vaste latéral par échographie lors d'une contraction maximale isométrique. Ensuite, il a opposé ces résultats à ceux de la raideur obtenue à partir de tests de sauts durant lesquels le temps de contact et le temps de vol ont été enregistrés. Il en conclut que la vitesse de contraction est reliée à la raideur des structures tendineuses pouvant être même impliquée à hauteur de 30%. Ainsi, il confirme les résultats obtenus par Bosco et al. (1992). On peut donc confirmer la pensée qu'une raideur des structures tendineuses permet un meilleur transfert de la force exercée par les composantes contractiles, vers les segments osseux.

Indéniablement impliquée dans la performance, les analyses effectuées ont souvent ciblé un public précis. Laffaye et al. (2005) ont donc effectué une étude permettant de comparer la raideur entre sportifs de différentes activités et de différents niveaux. Pour cela, ils ont effectué une batterie de tests avec des joueurs de basketball, de handball, de volleyball et des sauteurs en hauteur. À chaque fois il y avait un groupe expert et un groupe amateur. L'étude n'a pas démontré de différence entre la raideur des sportifs experts et des sportifs amateurs. Il explique donc la différence de performance, par une différence de force et de temps d'impulsion.

Nombreuses sont les analyses effectuées dans le domaine de la force explosive. Cependant, le domaine de la course longue a également été opposé à la raideur musculotendineuse.

Raideur et coût énergétique

Dalleau et al. (1998) a analysé le coût énergétique lors de la course à pied sur tapis, qu'il a ensuite comparé à la raideur de ses sujets. Il a pu en tirer la conclusion que le coût énergétique était inversement relié à la raideur musculotendineuse des sujets. Ainsi, plus le corps oscille, plus l'action musculaire est importante pour assurer la propulsion, ce qui augmente le cout énergétique.

Cette idée renforce les résultats similaires obtenus par McMahon et al. (1987) ou encore Zamparo et al. (1992). En effet, ils ont diminué la raideur musculotendineuse des sujets en modifiant la technique de course ou en courant sur une surface plus compliant. Tous les deux ont obtenu une augmentation des coûts énergétiques. Cela peut s'expliquer par le fait de devoir fournir plus d'efforts musculaires en augmentant la flexion des genoux, ou en perdant l'énergie dans le sol. Ainsi, on peut dire qu'il existe effectivement une relation entre la raideur musculotendineuse et le coût énergétique.

Raideur et prévention

Finalement, la mesure de la raideur musculotendineuse a aussi été utilisée dans le domaine de la prévention. En effet selon différents auteurs, les résultats de raideurs musculotendineuses peuvent donner un indice sur le risque de blessure.

Pruyn et al. (2005) ont analysé la raideur musculotendineuse de chaque jambe chez des joueurs de football australiens. Les tests de sauts ont été effectués au moins une fois par mois. Les résultats montrent que le groupe des joueurs blessés avait une différence de raideur plus importante que le groupe de joueurs non blessés. Butler et al. (2003) a expliqué qu'une raideur trop importante peut induire des blessures de types osseuses et une raideur trop faible, des blessures de types musculaires, ligamentaires ou tendineux.

La modification de la raideur par l'entraînement

Les méthodes d'entraînement ont considérablement changé durant les dernières décennies. C'est dans les années 1990 que de nombreuses recherches dans le domaine de l'optimisation de l'entraînement ont permis d'établir une base de données utile pour comprendre les adaptations du corps humain en réponse à l'entraînement qu'il subit. De nombreux procédés d'entraînement empiriques ont pu être expliqués de façon scientifique, pour rendre l'entraînement le plus efficace possible. Le terme d'individualisation est devenu de plus en plus important et la quête de l'entraînement idéal, pousse les préparateurs physiques et les chercheurs à définir de nouvelles méthodes d'entraînement. En effet, avec un calendrier de plus en plus chargé l'entraînement doit être adapté pour ne pas surcharger le sportif. La devise du « NO PAIN NO GAIN » perd tout son sens de ce point de vue. Pour cela, l'entraînement idéal aura pour objet de créer le plus d'adaptations possibles avec le plus faible volume possible.

Cependant, en se référant aux facteurs impliqués dans la raideur musculotendineuse, nous pouvons nous demander, quel type de travail est le plus efficace ? Nous savons qu'en termes de développement de la force deux méthodes d'entraînement sont souvent prisées. D'une part, il s'agit du renforcement musculaire ou couramment appelé la musculation. Elle consiste à réaliser de façon organisée des mouvements contre résistance afin d'engendrer une transformation du système neuromusculaire (Quièvre, 1997). D'autre part, il s'agit de la pliométrie, un mouvement musculaire d'étirement-raccourcissement qui induit une contraction excentrique intense suivie immédiatement d'une contraction concentrique puissante. Cette méthode de travail permet d'améliorer la capacité de stocker et de restituer l'énergie du système neuromusculaire et, par conséquent, la force explosive.

L'effet de l'entraînement en musculation

Kubo et al. (2010) se sont intéressés à l'effet d'un entraînement des muscles extenseurs de genou et des muscles extenseurs du pied. Après avoir divisé leurs sujets en deux groupes ils les ont soumis soit à un entraînement des quadriceps, soit à un entraînement des mollets, le but était de voir la différence d'adaptation des différents complexes muscle - tendon. Après un entraînement excentrique de 12 semaines, les deux groupes ont augmenté leurs raideurs respectives de plus de 25% sans établir de différence significative, ce qui permet de conclure

qu'a volume et intensité égale les adaptations des complexes muscle - tendon des extenseurs de genoux sont identiques à ceux des extenseurs de cheville. Auparavant Kubo et al. (2001) avaient déjà analysé l'effet de la durée de la contraction et de ses effets sur les structures tendineuses. Pour cela, ils ont effectué lors de l'entraînement des contractions isométriques de courte durée (1 s) et de longues durées (20 s) à 70% de la force concentrique maximale. L'étude a démontré que la raideur des membres avait augmenté significativement après les contractions de longue durée et non dans le groupe de courte durée. Ainsi nous pouvons donc présumer que les modifications musculotendineuses sont liées à la durée de contraction à laquelle elles sont contraintes.

Morrissey et al. (2001) sont allés plus loin et ont mené une étude durant laquelle ils ont comparé l'effet d'un entraînement excentrique et concentrique sur les adaptations tendineuses. Après 6 semaines d'entraînement, ils ont pu conclure que la raideur du tendon avait nettement diminué pour les sujets ayant effectué un entraînement excentrique, alors que pour le groupe de l'entraînement concentrique, il n'y a eu aucune modification. Nous pouvons donc en conclure que les augmentations de la raideur des membres sont liées à l'adaptation de la raideur musculaire et non tendineuse.

L'effet d'un entraînement pliométrique

L'effet d'un entraînement pliométrique a été sujet à de nombreuses recherches. On associe de nombreux bienfaits sur la performance à ce type d'entraînement. En effet, la pliométrie fait intervenir de nombreux facteurs qui sont reliés à la raideur musculotendineuse.

Kubo et al. (2007) ont étudié l'effet d'un entraînement en pliométrie et d'un entraînement en musculation sur les propriétés musculotendineuses. 12 semaines d'entraînements étaient effectuées avec 2 groupes de sujets qui effectuaient, soit des bondissements, soit du renforcement musculaire. Les résultats ont montré une augmentation de la raideur du tendon uniquement dans le groupe ayant pratiqué la musculation. Cependant la raideur du complexe muscle tendon s'était considérablement améliorée chez les sujets ayant effectué l'entraînement pliométrique. Nous pouvons donc présumer que l'adaptation est spécifique à l'entraînement mis en place. Ainsi, un travail en musculation aura plus de répercussion sur le tendon et sur l'activation musculaire, alors que le travail en pliométrie permet d'induire des modifications du complexe muscle - tendon. Cette étude a été confirmée par Fabrica et al. (2015) qui ont analysé l'effet d'un entraînement pliométrique sur la raideur des membres inférieurs chez des footballeurs. Durant 6 semaines, ils ont rajouté à l'entraînement traditionnel 500 – 1000 sauts par semaines de différentes natures (variante coordination,

bondissements verticaux, bondissements horizontaux). Les tests effectués en fin de cycle ont déterminé une augmentation de 18% de la raideur des membres inférieurs. Les auteurs associent cette augmentation de la raideur par une modification du complexe muscle - tendon.

De plus, Kubo et al. (1985) ont analysé l'influence des étirements passifs sur les propriétés tendineuses. Ils en ont conclu que les étirements statiques avaient tendance à diminuer la raideur du tendon. Par ailleurs, ils ont noté une diminution de la viscosité du tendon et une augmentation de son élasticité. Wilson et al. (1992) ont démontré que les étirements peuvent avoir un effet bénéfique sur le cycle étirement raccourcissement. Cette étude a été confirmée par Kubo et al. (2002). Pour cela, ils ont opposé un entraînement en musculation à un entraînement identique, suivi d'étirement statique. Ils en ont conclu que la raideur tendineuse n'était pas affectée que ce soit de façon positive ou de façon négative par les étirements. Cependant, dans le groupe ayant effectué des étirements, ils ont pu identifier une augmentation de la viscosité du tendon sans pour autant modifier son élasticité.

Quasiment toutes les recherches ont démontré que la raideur musculotendineuse peut être modifiée grâce à l'entraînement. En fonction des méthodes d'entraînement, l'amélioration de la raideur du complexe muscle tendon, peut être liée à l'augmentation de la raideur musculaire ou de la raideur du tendon. Néanmoins, les meilleurs résultats ont été obtenus lors des entraînements combinés à la pliométrie. En effet, cela peut s'expliquer par l'implication de tous les facteurs agissant lors de la mesure de la raideur musculotendineuse.

Finalement, Kubo et al. (2003) ont analysé l'effet de l'immobilité sur les propriétés tendineuses. Après avoir passé 20 jours au lit les mesures effectuées sur ses sujets ont démontré que l'immobilisation diminue la raideur tendineuse. Cependant, les résultats n'étaient pas identiques pour les tendons des extenseurs du genou et ceux des extenseurs du pied. Dans le premier cas, on retrouve une diminution de 28% contre 13% pour le deuxième.

Ainsi nous pouvons conclure que si les complexes muscle-tendon des extenseurs de genou et des extenseurs de pieds, s'adaptent identiquement à l'entraînement (Kubo et al. 2010), l'effet de l'immobilisation n'est en rien similaire. Cela peut être intéressant pour anticiper sur les effets d'une blessure sur la raideur du membre immobilisé.

Problématique, objectifs et hypothèses

L'intérêt de notre étude est lié au fait qu'il existe peu de recherches qui ont comparé différentes activités physiques.

La première consiste à mesurer la raideur musculo-tendineuse de différents sportifs, de différents niveaux. Le but sera d'analyser les résultats obtenus au niveau des sportifs pour déterminer, si oui, ou non la raideur musculotendineuse peut déterminer la performance.

Nous essayerons de comparer la raideur musculotendineuse des sujets à leur puissance (maximale et relative), pour déterminer s'il y a une corrélation entre les deux valeurs.

Ensuite, nous analyserons, l'évolution de la raideur musculotendineuse d'un groupe de sportifs. Les mesures ont été effectuées sur plusieurs mois.

D'après les différentes études menées sur l'effet de l'entraînement sur la raideur, nous sommes en mesure d'émettre l'hypothèse qu'elle susceptible de subir des variations liées aux cycles d'entraînement effectués.

Les questions à se poser seront donc de savoir si la raideur musculaire est un facteur discriminant de la performance et dans quelle mesure elle évolue avec l'entraînement.

Le Stage

Description des structures

Nos interventions ont eu lieu au sein de différentes structures sportives.

CREPS - Centre de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportives de Wattignies.

Construit dans les années 60 dans le domaine du château de Wattignies, le CREPS s'étend sur 17 hectares avec un parc verdoyant. Sous la tutelle du Ministère chargé des sports, la structure sportive a pour mission d'assurer la formation et la préparation des sportifs de haut niveau en conciliant la recherche de performance sportive et la réussite scolaire, universitaire ou professionnelle. De plus, la structure se charge d'organiser des formations professionnelles dans le domaine des activités physiques et sportives.

Actuellement, le CREPS compte 8 pôles labellisés, dont 1 Pôle France (hockey sur gazon), 3 Pôles France Jeunes (escrime masculin, volley-ball masculin, tir sportif) et 4 Pôles Espoir (athlétisme, basket-ball, volley-ball féminin, tennis de table) avec un total de 130 sportifs, encadrés par 15 entraîneurs, 4 médecins, 7 kinésithérapeutes, 1 préparateur physique, 1 préparateur mental, 1 ostéopathe, 1 infirmière, 1 cardiologue et 1 podologue, ainsi que plus de 300 vacataires.

De plus la structure accueille 1200 stagiaires sur 13 filières de formation différentes.

Actuellement, le CREPS est inscrit dans le réseau de GRAND INSEP, dont le projet dirigé par l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) vise à animer un réseau d'infrastructures au service de la performance sportive. La structure est tenue de suivre des cahiers de charges précis élaborés par l'INSEP et les fédérations françaises afin de garantir les conditions optimales de préparation, d'entraînement et de récupération des sportifs, pour répondre pleinement aux exigences du sport de haut niveau. Étant le seul établissement labellisé au nord de Paris, le CREPS de Wattignies peut ainsi rayonner sur la scène européenne.

Sportlycée - Luxembourg

Créé sous l'autorité du Ministère de l'Éducation Nationale et de la Formation Professionnelle du Luxembourg, le Sportlycée a pour mission de fournir d'une part un enseignement et un encadrement éducatif adapté à des élèves sportifs de haut niveau et d'autre part un dispositif de coordination de l'encadrement sportif.

D'un point de vue scolaire, le Sportlycée dispose d'un cycle inférieur de l'enseignement

secondaire technique, ainsi que la division inférieure et division supérieure de l'enseignement secondaire. De plus une coopération avec différents lycées est mise en place afin d'étoffer l'offre scolaire pour les sportifs. En matière d'organisation sportive, l'établissement garantit des horaires réservés à la préparation physique motrice et générale, ainsi que des horaires réservés à l'entraînement fédéral. A ceci se rajoute une équipe pédagogique, qui encadre l'élève dans l'organisation des déplacements sportifs.

Pour être éligible, les sportifs doivent tout d'abord respecter les critères d'admission scolaire, ainsi que les critères supplémentaires relatifs à leurs performances sportives. Ce sont les fédérations elles-mêmes qui proposent les sportifs potentiellement admissibles.

Aujourd'hui, le Sportlycée dénombre plus de 700 sportifs dans les différents centres de formation, dont 355 élèves répartis sur 17 classes et encadrés par 51 enseignants. On y comptabilise près de 113 entraîneurs fédéraux mis à disposition pour l'encadrement sportif.

De plus le Sportlycée est fier de son taux de réussite au bac, en 2015, un taux qui se situait à 93%.

Sujets

L'étude a été menée sur des sportifs de sexe masculin (39 hommes au total). Ils ont été divisés en 3 groupes. Un groupe basket-ball (B) contenant 18 sportifs de niveau amateur, un groupe volley-ball (V), contenant 7 sportifs de niveau amateur et un groupe athlétisme (A) contenant 14 athlètes de niveau national et international. Lors de l'analyse de l'évolution de la raideur les tests ont été effectués sur 4 sauteurs en longueur de niveau national inclus dans le groupe A. Les caractéristiques physiques de l'ensemble de nos sujets sont regroupées dans le tableau

	Athlétisme (n=14)		Basket-ball (n=18)		Volley-ball (n=7)		Tous (n=39)	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Age (ans)	21	4,79	18	3,53	20	2,41	20	3,95
Taille (m)	1,81	0,05	1,81	0,09	1,81	0,07	1,81	0,07
Masse (kg)	75,2	5,88	70,7	13,66	75,0	8,20	73,1	10,54
IMC	22,96	1,39	21,40	2,65	23,01	2,23	22,25	2,28

Tableau 1 Caractéristiques physiques des sujets

1. Les données complètes de chaque sujet sont reportées en annexe (tableaux 6 – 8).

Matériel :

Les tests de détente et de rebonds ont été mesurés avec l'OPTOPJUMP NEXT, développé par la société Microgate. Il s'agit d'un système de détection optique composé d'une barre émettrice et d'une barre réceptrice, contenant chacune 96 leds. Les leds placées sur les 2

barres communiquent en permanence. Le système va donc détecter les interruptions et calculer leur durée. Cela permettra de calculer le temps de contact et le temps de vol lors d'un ou plusieurs sauts avec une précision de 1/1000 de secondes.

L'équation de la raideur que nous avons utilisée lors de notre étude a été établie par Dalleau (1998). Cette équation nécessite peu de données de mesures et est donc facilement utilisable sur le terrain.

$$\text{Raideur} = \frac{M \times \pi \times (T_f + T_c)}{T_c^2 \left(\frac{T_f + T_c}{\pi} - \frac{T_c}{4} \right)} \text{ en N.m}^{-1}$$

La raideur est exprimée en N.m^{-1} , M équivaut à la masse du sujet en kg, T_f correspond au temps de vol, T_c correspond au temps de contact. Selon les études, la raideur affichée peut être exprimée en kN.m^{-1} ou en N.m^{-1} ($1 \text{ kN.m}^{-1} = 1000 \text{ N.m}^{-1}$)

Les valeurs de puissance ont été calculées avec la formule de Sayens (1999), qui permet d'évaluer la puissance maximale lors d'un saut.

$$\text{Puissance maximale (W)} = 60,7 \times [\text{Hauteur de saut (cm)}] + 45,3 \times [\text{Masse (kg)}] - 2055$$

Protocole des tests

Avant d'effectuer les tests, les sujets et les entraîneurs ont été informés des conditions de déroulements des différents tests, ainsi que la durée approximative. Nous avons effectué une démonstration sur les machines afin de leur expliquer le fonctionnement et faciliter la bonne exécution de l'opération. Tous les sujets étaient équipés de vêtements de sports, ainsi que de chaussures de sport.

L'échauffement a duré entre 10-15 min. Il s'est effectué de façon individuelle en athlétisme et de façons collectives en basketball et volleyball, afin de laisser à chacun la possibilité de mettre en place leur propre routine d'échauffement.

Ensuite, nous avons réexpliqué une seconde fois les consignes des différents tests. Les sujets ont eu deux passages non mesurés afin de se familiariser avec les consignes et le matériel.

Une fois le test débuté, chaque sujet a trois essais. Pour le Squat Jump et le Counter Mouvement Jump les essais ont été effectués successivement. Quant au test de rebonds, il n'y a eu que 2 essais. Tout le monde a d'abord effectué un premier essai dans l'ordre établi, avant d'en effectuer un deuxième, dans le même ordre. Dans les deux cas, nous avons retenu uniquement le meilleur passage.

Durant les tests, nous nous sommes efforcés de motiver les athlètes afin d'obtenir des résultats maximaux.

Pour analyser l'évolution de la raideur en fonction de l'entraînement, les tests ont été effectués toutes les 4 semaines. Il s'agissait de la semaine de repos relatif, qui suit un cycle d'entraînement. Le dernier test a été effectué la semaine qui suivait la fin de la saison hivernale.

Voici l'ordre dans lequel les tests ont été effectués :

Squat Jump (SJ) :

Pour ce test, le sujet se place entre les rails de l'OPTOJUMP, puis maintient une position de ½ squat avec une flexion de 90° mesurée entre la jambe et la cuisse. Les mains sont maintenues sur les hanches. Cette position de flexion à 90° est maintenue jusqu'au signal de départ. Le but est d'avoir uniquement une action concentrique sans prise de vitesse en amont. Les mains restent sur les hanches tout le long du squat. La réception s'effectue avec les jambes tendues. Ce test permet d'évaluer la force explosive des sujets. Ainsi, nous pouvons avoir une idée de la capacité du sujet à créer un grand niveau de force en un minimum de temps. D'un point de vue fonctionnel ce test permet d'exprimer la capacité de démarrage du sujet.

Counter Mouvement Jump (CMJ)

Lors de ce test, le sujet se place entre les rails, les mains sur les hanches. On donne la liberté au sujet de fléchir à l'angle qui lui semble le meilleur et d'effectuer un saut. Les mains restent sur les hanches tout le long du saut, jusqu'à la réception qui s'effectue sur des jambes tendues avant d'amortir. De nombreux auteurs expliquent que ce test permet d'évaluer la force explosive du sportif ainsi que la capacité à restituer l'énergie élastique. Cependant, Cometti (2001) est d'avis que la phase excentrique n'est pas suffisamment importante pour créer de l'énergie élastique. Selon lui la différence de hauteur par rapport au Squat Jump s'explique par un temps d'action plus long.

Test de Rebonds (Rebound Jumps - RJ)

Le sujet se place entre les rails, les mains toujours sur les hanches. Il effectue un enchaînement de 7 sauts, durant lesquels la consigne est de fléchir le moins possible au sol. Le premier saut s'effectue avec un élan, c'est-à-dire qu'il peut fléchir pour effectuer le premier saut. Pour les valeurs finales, le premier saut n'est pas pris en compte.

Nous avons décliné ce test sous deux variantes :

Le Rebound Jump Maximal (RJM) consistait à effectuer des sauts en fléchissant le moins possible au sol tout en effectuant des sauts maximaux, c'est-à-dire en essayant de sauter le plus haut possible. Ainsi, nous obtenons des valeurs de la raideur sur des sauts maximaux.

Ensuite, le Rebound Jump Submaximal (RJSM) consistait à effectuer des sauts sous maximaux. Nous leur avons laissé la liberté de sauter à la hauteur à laquelle ils se sentent le plus aptes à réagir le plus rapidement au sol, tout en maintenant les jambes tendues à la réception. Ainsi, nous obtenons des valeurs de la raideur sur de sauts sous maximaux.

Analyse statistique

Les valeurs des résultats de puissance et de raideur sont exprimées sous forme de moyenne et écart-type (moyenne \pm écart-type). Des diagrammes ont été utilisés afin de représenter visuellement les différences entre les groupes. Pour effectuer l'analyse statistique, nous avons utilisé le logiciel STATISTICA. L'analyse de la variance a été effectuée avec ANOVA. Les coefficients de corrélation ont été obtenus avec la corrélation de Spearman. Les résultats présents sont qualifiés de significatifs avec un seuil d'incertitude de 5% ($p < 0,05$).

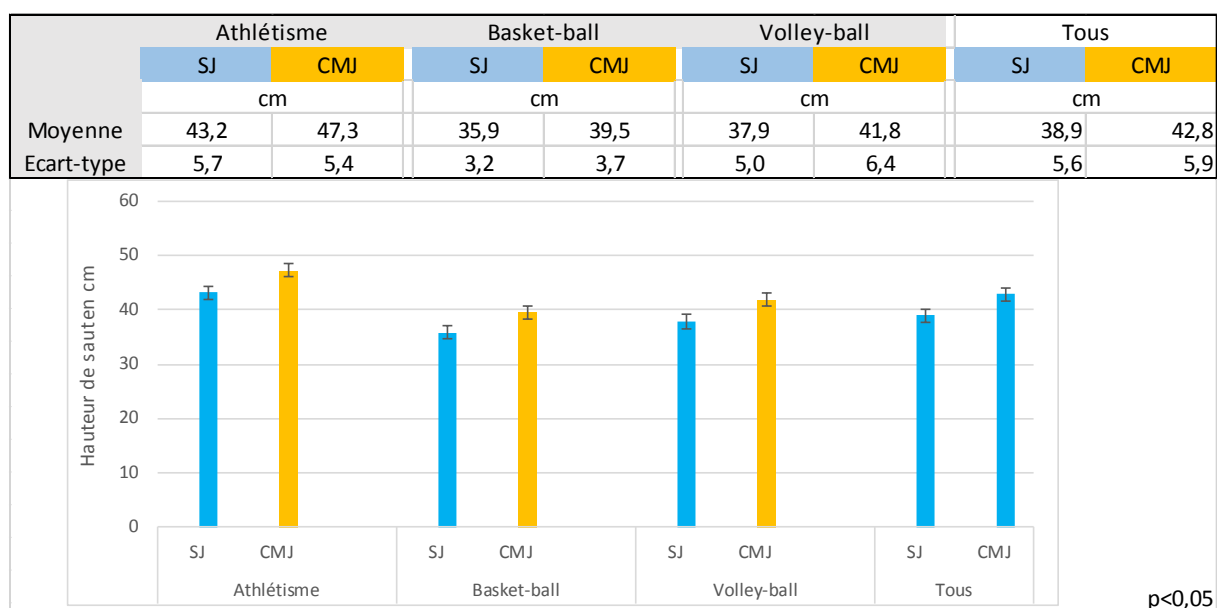


Tableau 2 Résultats des tests de Squat Jump (SJ) et Counter Mouvement Jump (CMJ)

Résultats

La hauteur (moyenne \pm écart-type) obtenue chez tous nos sujets (tableau 2) est de $38,9 \pm 5,6$ cm au Squat Jump (SJ) et de $42,8 \pm 5,9$ cm au Counter Mouvement Jump (CMJ). Les basketteurs affichent une moyenne au SJ de $35,9 \pm 3,2$ cm et au CMJ de $39,5 \pm 3,7$ cm. Les volleyeurs présentent des valeurs de $37,9 \pm 5$ cm au SJ et $41,8 \pm 6,4$ cm au CMJ. Uniquement les sujets du groupe athlétisme obtiennent des résultats supérieurs à la moyenne avec $43,2 \pm 5,7$ cm au SJ et $47,3 \pm 5,4$ cm au CMJ. La meilleure performance se situe à $52,3$ cm pour le SJ et $56,2$ cm pour CMJ (voir annexe tableau 9-11). Une différence significative a été trouvée entre les performances de sauts des différents groupes ($p < 0,05$).

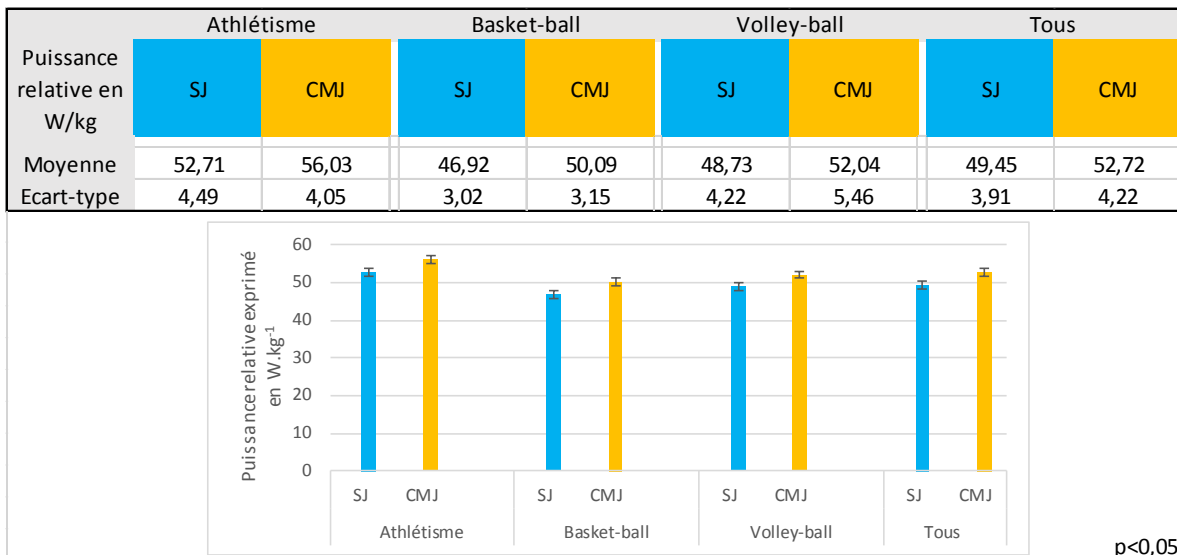


Tableau 3 Puissance relative obtenue à partir du Squat Jump (SJ) et du Counter Mouvement Jump (CMJ)

La puissance relative moyenne (tableau 4) de nos sujets est de $49,45 \pm 3,91 \text{ W.kg}^{-1}$ lors du SJ et de $52,72 \pm 4,22 \text{ W.kg}^{-1}$ lors du CMJ. Les sujets du groupe basket-ball ont développé une puissance relative de $46,92 \pm 3,02 \text{ W.kg}^{-1}$ et $50,09 \pm 3,15 \text{ W.kg}^{-1}$ au CMJ. Quant au groupe volley-ball, la puissance relative était de $48,73 \pm 4,22 \text{ W.kg}^{-1}$ au SJ et $52,04 \pm 5,46 \text{ W.kg}^{-1}$ au CMJ. Le groupe athlétisme a obtenu les meilleurs résultats avec une puissance relative de $52,71 \pm 4,49 \text{ W.kg}^{-1}$ au SJ et $56,03 \pm 4,05 \text{ W.kg}^{-1}$ au CMJ.

Le diagramme du tableau 4 représente la comparaison des puissances relatives produites par chaque groupe. Une différence significative a été trouvée entre les différents groupes ($p < 0,05$). Les tableaux 9-11 mis en annexe regroupent les résultats individuels de chaque sujet.

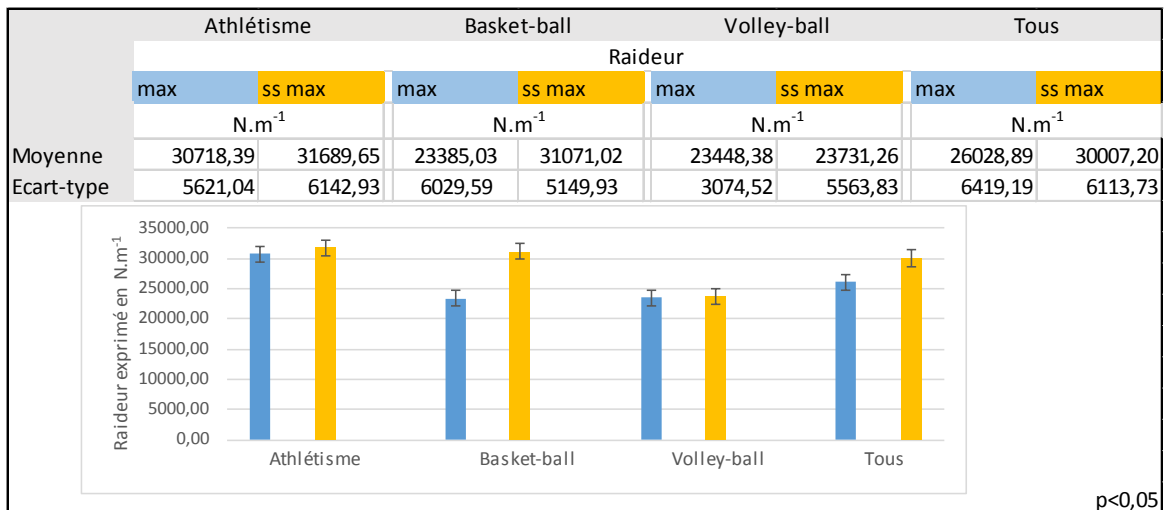


Tableau 4 Résultats de raideur obtenus sur les sauts maximaux et sous maximaux

La raideur maximale (max) équivaut aux résultats obtenus à travers les rebonds maximaux (RJM). Les valeurs sous maximales (ssmax) équivalent aux résultats obtenus lors des rebonds sous maximaux (RJSM). Les résultats moyens s'élèvent à 26028 ± 6419 N.m⁻¹ pour les rebonds maximaux et à 30007 ± 6113 N.m⁻¹ pour les rebonds sous maximaux. Le groupe volley-ball affiche une raideur de 23448 ± 6029 N.m⁻¹ lors des rebonds maximaux et une raideur de 23731 ± 5563 N.m⁻¹ lors des sauts sous maximaux. Le groupe basket-ball obtient des valeurs plus élevées avec 23385 ± 6029 N/m⁻¹ pour les rebonds maximaux et 31071 ± 5149 N.m⁻¹ pour les rebonds sous maximaux. Les meilleurs résultats ont été atteints par le groupe athlétisme. Ils obtiennent une raideur de 30718 ± 5621 N.m⁻¹ en ce qui concerne les rebonds maximaux et 31689 ± 6142 N.m⁻¹ pour les rebonds sous maximaux. Une différence significative a été trouvée entre les différents groupes, ainsi qu'entre les valeurs des rebonds maximaux et sous maximaux ($p < 0,05$). Le tableau 4 illustre la différence des résultats de raideur obtenue lors des différents sauts. Les résultats de tous nos sujets sont à retrouver en annexe dans les tableaux 9-11.

	Athlétisme			Basket-Ball			Volley-ball		
	Puissance relative au SJ (W.kg ⁻¹)	Puissance relative au CMJ (W.kg ⁻¹)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux (N.m ⁻¹)	Puissance relative au SJ (W.kg ⁻¹)	Puissance relative au CMJ (W.kg ⁻¹)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux (N.m ⁻¹)	Puissance relative au SJ (W.kg ⁻¹)	Puissance relative au CMJ (W.kg ⁻¹)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux (N.m ⁻¹)
Raideur K sur les sauts maximaux (N.m ⁻¹)	-0,221	0,182	0,854	-0,118	-0,0234	0,296	0,642	0,571	-0,085
Raideur K sur les sauts sous-maximaux (N.m ⁻¹)	0,036	0,227	1	-0,074	0,236	1	0,2	0,028	1

Tableau 5 Coefficient de corrélation de Spearman entre la raideur et la puissance des différents groupes

Nous observons aucune corrélation entre la puissance relative et la raideur, qu'elle soit calculée à partir des rebonds maximaux ou sous maximaux, dans le groupe Athlétisme et Basket-ball. Uniquement le groupe Volleyball affiche une corrélation entre la puissance relative lors des SJ et la raideur lors des rebonds maximaux ($r = 0,642$; $p < 0,05$). Pour le même groupe, nous retrouvons une forte corrélation entre la raideur obtenue sur les rebonds sous maximaux et la puissance maximale au SJ ainsi qu'au CMJ ($r = 0,945$; $p < 0,05$) (voir tableau 14 en annexe).

De plus nous notons une corrélation entre la raideur des sauts maximaux et des sauts sous maximaux uniquement dans le groupe Athlétisme ($r = 0,854$; $p < 0,05$).

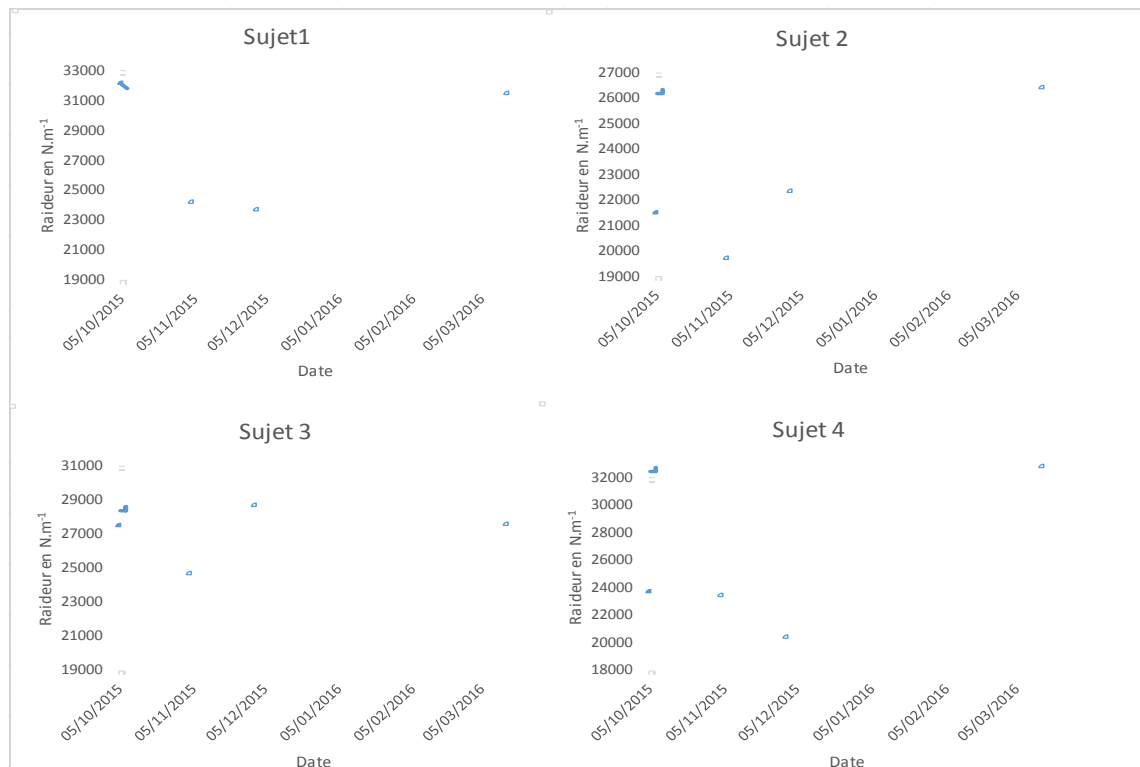


Figure 7 Comparaison de l'évolution de la raideur (exprimé en N.m⁻¹)

Les résultats affichés dans la figure 7 représentent l'évolution des valeurs de la raideur obtenues sur des sauts maximaux. Nous notons chez l'ensemble de nos sujets une évolution similaire des valeurs de la raideur. Tous affichent une baisse considérable de la raideur, avant de voir leurs valeurs augmenter fortement jusqu'à la fin de saison. Uniquement le sujet 3 obtient des valeurs stagnantes jusqu'en fin de saison. Les valeurs complètes des sauteurs sont regroupées dans les tableaux 17 et 18 en annexe.

Discussion

Valeurs de la puissance

Nos résultats de puissance obtenus auprès de nos sujets correspondent aux valeurs que nous pouvons retrouver dans la littérature. Yahmed (2011) a obtenu une puissance moyenne de 3031 ± 656 W sur le CMJ pour une centaine de sujets de sexe masculin pratiquant des sports collectifs. Ainsi, nous pouvons observer que tous nos groupes se situent largement au-dessus de ce niveau de puissance avec un maximum de 4223 W pour le groupe A et un minimum de 3607 W pour le groupe B (voir tableau 9-11 en annexe).

Dalleau et al (2007) ont analysé la puissance de sprinteur italiens et sénégalais de haut niveau et ont obtenu une moyenne de $52,3 \pm 8,7$ W.kg⁻¹. Nous pouvons donc constater que nos groupes B et V se situent légèrement en dessous de ces valeurs ($46,92 \pm 3,02$ W.kg⁻¹ et $48,73 \pm 4,22$ W.kg⁻¹.) ce qui démontre qu'il s'agit de sujets n'ayant pas de qualités physiques de haut niveau. Cependant, notre groupe A obtient des valeurs de puissance similaire ($52,71 \pm 4,49$ W.kg⁻¹). Cela confirme bien qu'il s'agit d'un groupe de haut niveau avec des sujets de niveau national et international.

Comme l'illustre le tableau 3, le groupe composé d'athlètes a été capable de produire un niveau de force nettement plus important que les deux autres groupes. Cela peut simplement s'expliquer par le fait qu'il s'agit dans notre cas de sportifs de haut niveau. Cependant à niveau égal, nous remarquons que le groupe V obtient des valeurs de puissance plus élevées que le groupe B.

De plus, la différence de résultat au sein du groupe A peut s'expliquer par les différents profils d'athlètes. En effet, le groupe étant composé de sprinteurs, de sauteurs en hauteur et longueur ainsi que de décathloniens, les résultats peuvent fortement varier selon les qualités des différents athlètes.

Selon de nombreuses études les sprinteurs présentent toujours un niveau de puissance très élevé par rapport aux autres disciplines de même niveau.

Valeurs de la raideur

En se référant aux différentes études ayant mesuré la raideur, nous constatons que les valeurs de nos sujets sont cohérentes. Dalleau et al. (2007) ont effectué les tests de rebonds maximaux sur des sprinteurs et des skieurs internationaux. Les valeurs des sprinteurs se situaient à 34913 ± 5297 N.m⁻¹ et 21589 ± 3697 N.m⁻¹ pour les skieurs. Les valeurs de l'ensemble de nos sujets se situent dessous des valeurs des sprinteurs testés dans cette étude, mais sont supérieures aux

résultats des skieurs. En analysant les groupes entre eux, nous apercevons que le groupe V est celui avec la raideur la plus faible. Le groupe A affiche clairement les résultats les plus élevés sur les rebonds maximaux.

Cependant en analysant la raideur sur les sauts sous maximaux, nous nous rendons compte que pour l'ensemble de nos groupes la raideur augmente. Le groupe V maintient une valeur relativement faible par rapport aux deux autres groupes. Cependant, le groupe B obtient des résultats de raideur quasiment identiques au groupe A.

Ce constat confirme les différentes études menées sur la régulation de la raideur en fonction de la hauteur de saut. En effet, en analysant l'équation de la raideur de Dalleau (1998) nous pouvons constater que le résultat peut fortement varier selon le temps de contact au sol. En général, les tests de rebonds se font soit sur des sauts maximaux soit avec une fréquence de saut imposée.

Dalleau et al. (2003) ont imposé différentes des fréquences de sauts allant de 1,8 – 4 Hz. Ils ont noté une évolution de la raideur de $23,3 \pm 10,2 \text{ N.m}^{-1}$ à $66,8 \pm 5,8 \text{ N.m}^{-1}$, soit du simple au triple. Ce constat fut déjà réalisé par Maarten et al. (2011), lors d'une analyse du comportement de la raideur sur des sauts maximaux et sous maximaux. Ils ont observé une diminution significative de la raideur avec l'augmentation de la hauteur de saut. Cette diminution de la raideur peut notamment s'expliquer par une augmentation de la flexion des genoux lors des rebonds maximaux. En effet, Maarten et al. (2011) ont remarqué que lors des sauts sous maximaux, les sujets étaient capables de garder leur articulation verrouillée et ainsi limiter une flexion excessive et, par conséquent obtenir un temps de contact plus court. Dès lors que la hauteur de saut augmentait, la position de rebond retrouvée lors des sauts sous maximaux est abandonnée au profit d'une flexion plus importante. Cela permet au sujet d'utiliser les quadriceps pour résister à la force excentrique et ainsi exprimer un niveau de force plus important lors de la poussée. Cette idée est confirmée par Laffaye et al (2005). Ils contredisent de nombreux auteurs en affirmant que la hauteur de saut n'est pas la cause de la diminution de la raideur, mais le niveau de flexion des genoux. En effet, ils ont noté une diminution notable de la raideur, lorsque l'on augmente l'amplitude de flexion au moment du rebond. Les sujets passent de 36 kN.m^{-1} à $7,3 \text{ kN.m}^{-1}$ en fléchissant les genoux. De plus ils notent, que sans modification du pic excentrique, le pic concentrique qui atteint 6 fois le poids de corps en effectuant le rebond avec les jambes tendues, contre 2,9 fois le poids de corps lorsque l'on fléchit à la réception. Nous pouvons donc dire que la flexion joue un rôle important dans la raideur des membres inférieurs. Ce constat peut être intéressant, notamment dans les disciplines athlétiques, qui nécessitent une impulsion. Ainsi, l'entraînement peut être

orienté de façon à obtenir une impulsion avec une flexion limitée afin de pouvoir profiter d'un niveau de raideur le plus élevé possible.

Lors de notre étude la flexion des genoux de nos sujets n'a été contrôlée que visuellement. La consigne donnée était d'avoir le temps de contact le plus court possible et de fléchir le moins possible au sol.

Relation entre la raideur et la puissance

Pour les groupes A et B, aucune corrélation n'a été trouvée entre la puissance relative au SJ ou au CMJ et la raideur sur les sauts maximaux, ni sur les sauts sous maximaux. Seul le groupe V affiche une faible corrélation entre la raideur sur les sauts maximaux et la puissance relative au SJ ($r=0,642$) et au CMJ ($r=0,571$). Cette absence de corrélation a déjà été mise en évidence par Dalleau et al. (2004) qui n'ont pas pu relier la puissance à la raideur chez des sujets qui n'étaient pas sportifs de haut niveau. Toutefois, en comparant la puissance maximale à la raideur issue des sauts maximaux et sous maximaux, nous observons que le groupe A n'affiche aucune corrélation. Il en est de même pour le groupe B, qui présente qu'une faible corrélation entre la puissance maximale au SJ et la raideur des sauts maximaux ($r=0,521$). Nous pouvons également apercevoir une corrélation entre la puissance maximale au CMJ et la raideur des rebonds sous maximaux ($r=0,611$). Toutefois, il est intéressant de noter que dans le groupe V plusieurs corrélations ont été obtenues avec la puissance maximale. En effet, la puissance maximale au SJ est fortement reliée à la raideur sur les sauts sous maximaux ($r=0,94$). Il en est de même pour la puissance maximale au CMJ ($r=0,942$). Dalleau et al (2007) avaient déjà obtenue de tels résultats sur en comparant la puissance maximale de sprinteurs à leur raideur sur des sauts maximaux. Comme dans notre cas, la relation variait en fonction de l'activité des sujets. Ainsi, ils supposent que la relation existe en fonction du sport pratiqué et non pas du niveau d'entraînement.

Ce constat peut s'expliquer par le fait que lors d'un mouvement pliométrique, la majeure partie de la puissance peut être délivrée soit par la CC, soit par la capacité du complexe muscle-tendon à emmagasiner et restituer l'énergie élastique.

Il faut être prudent, car en analysant la hauteur moyenne des rebonds maximaux nous nous rendons compte que le groupe V est celui qui a atteint la plus faible hauteur. Cela engendre donc des contraintes moins importantes à la réception et donc par conséquent une meilleure capacité à maintenir les jambes tendues et éviter toute flexion. Gullhofer et al. (1991) ont mis en évidence que lors des sauts sous maximaux l'énergie emmagasinée lors de la phase excentrique était inférieure à celle délivrée lors de la phase propulsive. Cela explique la

diminution du temps de contact au sol lors de sauts sous maximaux. En effet, devant subir des contraintes excentriques moindres, le corps est capable d'exercer sans attendre une contraction concentrique. Ce transfert d'énergie est également accéléré par d'autres facteurs telles que la CES et la CEP. Cependant, lors de sauts maximaux, l'énergie emmagasinée lors de la phase excentrique est supérieure à l'énergie libérée lors de la propulsion, ce qui augmente le temps de contact au sol. On peut donc noter, qu'il y a une perte d'énergie à travers des facteurs (CC, CES, CEP) pas suffisamment efficace pour emmagasiner et transférer toute l'énergie élastique.

D'autre part, en analysant les résultats individuels de nos sujets, nous pouvons observer que, pour un même niveau de raideur, les sujets du groupe A sont capables de développer une puissance plus importante (voir tableau 9 – 11). Ce constat fut déjà réalisé par Dalleau et al. (2007). Ils expliquent cela par la qualité de production de puissance lors d'un mouvement pliométrique. Selon eux, la spécificité de l'activité joue un rôle majeur dans la capacité de tirer profit l'énergie lors d'un mouvement pliométrique. Nous savons que la restitution d'énergie lors d'un mouvement pliométrique va dépendre du système musculo-tendineux à absorber et des contraintes répétées. En athlétisme, la durée moyenne du temps de contact au sol est de moins de 100 ms au sprint et d'environ 160 ms au saut en hauteur ou au triple saut. Il s'agit donc de sujets habitués à absorber des charges atteignant plusieurs fois leurs poids de corps en une fraction de seconde. De telles contraintes mécaniques ne se retrouvent pas dans les deux autres groupes (B et V). Cela peut également expliquer la différence de raideur lors des sauts maximaux entre le groupe A et B et qui n'existe quasiment plus lors des sauts sous-maximaux.

Evolution de la raideur

L'évolution de la raideur de nos sujets correspond aux résultats obtenus par Richter (2014). En effet, il a analysé sur une période de 3 ans, le temps de contact et le temps de vol de sportifs. Il a pu en déterminer un coefficient d'efficacité. Cependant, il a favorisé la fréquence de saut et non la hauteur afin d'avoir une action du système neuromusculaire plus important. Toutefois, nos valeurs obtenues suivent la logique de ses résultats. Richter (2014) explique que le test de Tapping peut parfaitement s'utiliser comme outil de détection et d'évaluation de l'entraînement.

Limites

Cependant, il faut noter, que lors de notre étude, nous avons atteint certaines limites, notamment en ce qui concerne le matériel. Il va de soi que l'OPTOJUMP est un outil

formidable pour l'évaluation du sportif. En effet, il est peu onéreux et permet de mesurer de nombreux paramètres de façon fiable. Toutefois, dans notre étude, il aurait été intéressant d'effectuer les tests de rebonds sur une plateforme de force, afin d'obtenir des résultats plus pointus, notamment en matière de la force appliquée lors des sauts. Initialement, nous voulions mesurer de la manière la plus simple, afin qu'elle soit facilement transférable sur le terrain, cependant pour des analyses plus poussées, l'utilisation d'une plateforme de force serait de toute utilité. De plus, le fait de ne pas avoir filmé les sauts des sujets afin de déterminer le niveau de flexion lors de rebonds peut également être une limite de notre étude. En effet, nous connaissons l'influence de la flexion dans la régulation de la raideur et la différence de résultats qui peut en être la conséquence. Tout de même, nous pouvons dire que le test est facilement applicable sur le terrain, sans nécessairement avoir besoin de beaucoup de matériel.

Enfin, le fait de ne pas avoir quantifié la charge d'entraînement, afin de l'opposer à l'évolution de la raideur, ne nous permet que de parler en termes de logique de planification. En effet, nous partons de l'hypothèse que les athlètes ont démarré avec un cycle de préparation physique généralisé, pour arriver progressivement à une préparation spécifique du saut en longueur.

Conclusion

Grâce à nos tests effectués, nous sommes en mesure de dire, qu'il existe une différence significative de la raideur lors des sauts maximaux entre des sujets des différents sports. De plus, les résultats obtenus lors des rebonds maximaux et sous maximaux illustrent le rôle de la fréquence de saut dans le calcul de la raideur musculotendineuse. Nous pouvons donc nous poser la question, des consignes à donner lors d'un test de rebonds maximaux. Faut-il favoriser la hauteur de saut maximale ou au contraire, favoriser la fréquence de saut, pour obtenir la raideur maximale d'un sportif. Ainsi, nous pouvons remettre en question la qualité physique réellement évaluée lors des rebonds maximaux.

En outre, nous pouvons réfuter l'hypothèse que la raideur musculotendineuse est liée à la puissance relative d'un sportif. Toutefois, nos résultats ont montré, que selon l'activité analysée, la raideur peut être corrélée à la puissance maximale du sportif. Une fois de plus cette corrélation s'effectue avec la raideur des sauts sous maximaux, ce qui renforce l'idée de favoriser des sauts en fréquence.

Finalement, grâce au suivi de plusieurs athlètes de haut niveau, nous avons pu noter une évolution de la raideur tout au long de la période de préparation et de compétition. Nous pouvons mettre en évidence, que l'évolution de la raideur qui suit la logique de planification de l'entraînement. Il serait donc intéressant de la corrélérer à la charge d'entraînement, afin de voir si la raideur permet de prédire le niveau de fatigue d'un athlète.

En termes d'entraînement, nous pouvons mettre en évidence, que la hauteur de saut lors des séances pliométriques va jouer un rôle important dans la progression de l'athlète. En effet, nous avons vu que la raideur est supérieure lors des sauts sous maximaux. Ces valeurs sont d'autant plus importantes dans les sports collectifs. Il serait donc judicieux, en tant que préparateur physique, de choisir une hauteur de saut sous maximale afin d'obtenir un rendement plus efficace de la raideur.

Perspectives

J'espère qu'avec cette étude, j'ai pu apporter un élément de plus dans l'analyse de la raideur musculotendineuse.

Le but n'est pas de remettre en cause les différents tests effectués, mais je me suis rendu compte, que souvent, des sauts sont effectués par habitude et sans réellement savoir ce qu'ils évaluent. Il serait donc intéressant de comparer les tests de rebonds sous maximaux à différentes fréquences, afin de déterminer s'il peut s'agir d'un facteur discriminant.

Je pense que le plus intéressant est de continuer sur la lancée de cette étude et mettre en avant des rebonds sous maximaux, à différentes fréquences.

Par ailleurs, je pense que nous sommes sur la bonne voie, en analysant l'évolution de la raideur. Il serait intéressant de l'évaluer sur une population plus vaste et plus hétérogène, afin de déterminer si oui ou non, la raideur peut refléter l'état de forme d'un athlète. Cela permettrait aux entraîneurs et aux préparateurs physiques d'avoir un retour fiable de l'entraînement et d'améliorer ainsi la prévention des blessures liées au surentraînement chez le sportif.

Références bibliographiques :

- Aura O. et Komi P.V. (1987). Effects of prestretching intensity on mechanical efficiency of positive work and on elastic behaviour of skeletal muscle in stretch-shortening cycle exercise. *International Journal of Sports Medicine*, **7**, 137-143
- Bojsen-Møller J. Peter Magnusson S. Rasmussen L.R. Kjaer M. et Aagaard P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures *Journal of Applied Physiology*, **99**, 986-994
- Bosc C. Tarkka I et Komi P.V. (1992). Effect of elastic energy and myoelectric potentiation of triceps surae during stretch-shortening cycle exercises. *International Journal of Sports Medicine*, **3**, 137-140
- Bret C. Rahmani A. Dufour A. Messonnier L. et Lacour J-R. (2002). Leg strength and stiffness as ability factors in 100m sprint running. *Journal of Sports Medicine, Physical Fitness*, **42**, 274–281
- Butler R.J. Crowell H.P. et McClay D. (2003). Lower extremity stiffness: implications for performance and injury *Clinical Biomechanics*, **18**, 511–517
- Cavagna G.A. (1977). Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise and Sport Science Reviews*, **5**, 89-129
- Chapman AE. (1985). The mechanical properties of human muscle. *Exercise and Sports Science Reviews*, **13**, 443-501.
- Chelly SM., Denis C. (2001). Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Medicine and Science in Sports Exercise*, **33**, 326-33
- Choukou A. (2006). Effet de la hauteur du contre haut sur la régulation de la raideur des membres inférieur : comparaison entre les 2 sexes, Université de Paris Sud 11
- Cometti G. (2001). La préparation physique au Basket, *Edition Broché*
- Dalleau G. Belli A. Bourdin M., et Lacour J.R. (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *European Journal of Applied Physiology*, **77**, 257–263
- Dalleau G. Belli A. Viale F. Lacour J-F. Bourdin M. (2004). A simple method for field measuring of leg stiffness in hopping. *International Journal of Sports Medicine*, **25**, 170-176

- Dalleau G. Rahmani A. et Verkindt C. (2007). Relation entre la puissance et la raideur musculotendineuse chez les sportifs de haut niveau. *Science & Sports*, **22**, 110–116
- Erich J., Luke R, Gareau L. et William P. (2010). Force, Velocity and Power Adaptations in response to a periodized plyometric training program *28th international conference in sport biomechanics*
- Fabrica G. Lopez F. et Souto A. (2015). Effects of power training in mechanical stiffness of the lower limbs in soccer players. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, **8(4)**, 145-149
- Gollhofer A. Stronjnik V. Rapp W. Schweizer L. (1991). Behaviour of triceps surae muscle tendon complex in different jump conditions *European Journal of Applied Physiology*, **64**,283-291
- Kubo K. Kaneshisa H. Kawakami Y. Fukunaga T. (1985). Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *Journal of applied Physiology*, **2**, 520-527
- Kubo K. Kanehisa H. Fukunaga T. (2001). Is passive stiffness in human muscles related to the elasticity of tendon structures. *European Journal of Applied Physiology*, **85(3-4)**, 226-232
- Kubo K. Kanehisa H. Fukungana T. (2001). Effects of different duration isometric contractions on tendon elasticity in human quadriceps muscles. *Journal of Applied Physiology*, **532(2)**, 649-655
- Kubo K., Masanaori M., Teruaki K., Hideaki Y., Naoya T., Hiroaki K., Tetsuo F. (2007). Effects of Plyometric and weight training on muscle tendon complex and Jump performance. *Medicine and Science in sports exercise*, **39(10)**, 1801-1810
- Kubo K., Ikebukuro T., Yata H., Tsunoda N., Kanehisa H. (2010). Effects of Training on Muscle and Tendon in Knee Extensors and Plantar Flexors in Vivo. *Journal of Applied Biomechanics*, **26**, 316-323
- Laffaye G., Taiar R., Bardy B.G. (2005). The effect of instruction on leg stiffness regulation in drop jump *Science and Sports* 136-143
- Laffaye G., Bardy B.G., Durey A. (2005). Leg Stiffness and Expertise in Men jumping *Medicine and Science in Sports and Exercise* **37(4)**, 536-543

- Lockie RG., Jalilvand F., Callaghan SJ., Jeffriess MD., Murphy AJ. (2015). Interaction between leg muscle performance and sprint acceleration kinematics. *Journal of Human Kinetics*, **49**, 65-74
- Maarten F., Bobbert L., et Richard Casius J. (2011). Spring-like leg behaviour, musculoskeletal mechanics and control in maximum and submaximum height human hopping. *Philosophical Transactions Of The Royal Society*, **366**, 1516 – 1529
- McMahon TA., Valiant G., Frederick EC. (1987). Groucho running. *J Appl Physiol*. **62**,2326-2337
- Morrissey D., Roskilly A., Twycross-Lewis R., Isinkaye T., Screen H., Woledge R., Bader D. (2011). The effect of eccentric and concentric calf muscle training on Achilles tendon stiffness. *Clinical Rehabilitation*, **3**, 238-2347
- Pruyn E.C., Watsford M.L., Murphy A.J., Pine M.J., Spurrs R.W., Cameron M.L., Johnston R.J. (2012). Relationship between leg stiffness and lower body injuries in professional Australian football. *Journal of Sports Science*, **30(1)**, 71-78
- Sayers SP., Harackiewicz D., Harman EA., Frykman PN., Rosenstein MT. (1999). Cross-validation of three jump power equations. *Medicine and Science in sports exercise*. **4**, 572-577
- Secomb JL., Lundgren LE., Farley OR., Tran TT. Nimphius S., Sheppard JM. (2015). Relationships Between Lower-Body Muscle Structure and Lower-Body Strength, Power, and Muscle-Tendon Complex Stiffness. *Journal of strength and conditioning training*, **8**, 2221-2228
- Thyus H., Faraggiana T., Margaria R. (1972). Utilization of muscle elasticity in exercise. *Journal of Applied Physiology*. **32**, 491-494.
- Wilson GJ., Elliott B.C., Wood G.A. (1991). The effect on performance of imposing a delay during a stretch-shorten cycle movement. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **23**, 364-370
- Wilson GJ.: Elliott BC. Wood GA. (1992) Stretch shorten cycle performance enhancement through flexibility training. *Medicine and Science in sports exercise*, **1**, 116-123.
- Zamparo P. Perrini R. Orizio C. Sacher M. et Ferretti G. (1992) The energy cost of walking or running on sand. *European Journal of Applied Physiology*, **65**, 183-187.

Sites internet:

http://campusport.univ-lille2.fr/ressource_gym/co/Theorie_4.html

<http://prevost.pascal.free.fr/theorie/muscle/relFL.htm>

<http://www.sps-formations.com/wp-content/uploads/2012/09/Force-musculaire.pdf>

<http://stapscrew.free.fr/Texte/Muscle5.htm>

<http://www.creps-wattignies.fr/>

<http://portal.education.lu/sportlycee>

ANNEXE

Sport	Sujet N°	Sexe	Age	Taille	Poids	IMC
			(ans)	(m)	(kg)	
A	1	M	16	1,75	73,1	23,87
A	2	M	15	1,79	68,4	21,35
A	3	M	23	1,89	78,8	22,06
A	4	M	31	1,83	75	22,40
A	5	M	25	1,81	81	24,72
A	6	M	18	1,71	67	22,91
A	7	M	16	1,8	65	20,06
A	8	M	22	1,86	80	23,12
A	9	M	21	1,86	81,6	23,59
A	10	M	19	1,88	79,8	22,58
A	11	M	23	1,75	71	23,18
A	12	M	17	1,79	77,8	24,28
A	13	M	18	1,81	71,9	21,95
A	14	M	28	1,81	83	25,34
Moyenne			20,9	1,81	75,2	22,96
Ecart type			4,79	0,05	5,88	1,39
Min			15	1,71	65	20,06
Max			31	1,89	83	25,34

Tableau 6 Caractéristique physique des sujets en Athlétisme (A)

Sport	Sujet N°	Sexe	Age	Taille	Poids	IMC
			(ans)	(m)	(kg)	
B	15	M	22	1,87	90,7	25,94
B	16	M	28	1,95	98,4	25,88
B	17	M	17	1,92	73,6	19,97
B	18	M	21	1,83	81	24,19
B	19	M	22	1,78	70	22,09
B	20	M	17	1,8	71,7	22,13
B	21	M	15	1,73	57,4	19,18
B	22	M	15	1,7	51,2	17,72
B	23	M	21	1,95	85,1	22,38
B	24	M	20	1,85	71,3	20,83
B	25	M	17	1,82	75,7	22,85
B	26	M	21	1,92	76,8	20,83
B	27	M	17	1,78	66,6	21,02
B	28	M	16	1,74	74,4	24,57
B	29	M	16	1,82	68,3	20,62
B	30	M	16	1,73	61,3	20,48
B	31	M	15	1,67	47,1	16,89
B	32	M	15	1,7	51,2	17,72
Moyenne			18,4	1,81	70,7	21,40
Ecart type			3,53	0,09	13,66	2,65
Min			15	1,67	47,1	16,89
Max			28	1,95	98,4	25,94

Tableau 7 Caractéristiques physique des sujets au Basket-ball (B)

Sport	Sujet N°	Sexe	Age	Taille	Poids	IMC
			(ans)	(m)	(kg)	
V	33	M	18	1,75	65,9	21,52
V	34	M	24	1,8	79,7	24,60
V	35	M	19	1,75	64,6	21,09
V	36	M	19	1,92	74,3	20,16
V	37	M	17	1,84	88,5	26,14
V	38	M	20	1,85	77,7	22,70
V	39	M	22	1,73	74,4	24,86
Moyenne			19,86	1,81	75,0	23,01
Ecart type			2,41	0,07	8,20	2,23
Min			17	1,73	64,6	20,16
Max			24	1,92	88,5	26,14

Tableau 8 Caractéristiques physique des sujets au Volley-ball (V)

Sport	Sujet N°	SJ	CMJ	Puissance maximale développé au SJ	Puissance relative développé au SJ	Puissance maximale développé au CMJ	Puissance relative développé au CMJ	Raideur K sur sauts établis sur les sauts maximaux	Raideur K établi sur les sauts sous-maximaux
		(cm)	(cm)	(W)	(W.kg ⁻¹)	(W)	(W.kg ⁻¹)	kN.m ⁻¹	kN.m ⁻¹
A	1	46,7	51,5	4091,12	55,97	4382,48	59,95	45 548	
A	2	36,8	41	3277,28	47,91	3532,22	51,64	36 410	46 040
A	3	39,4	47,9	3906,22	49,57	4422,17	56,12	34 679	
A	4	36,8	47,3	3576,26	47,68	4213,61	56,18	32 903	34 285
A	5	52,3	56,2	4788,91	59,12	5025,64	62,04	32 647	35 533
A	6	42,7	43,5	3571,99	53,31	3620,55	54,04	31 534	34 425
A	7	32,8	37,9	2880,46	44,31	3190,03	49,08	28 771	29 163
A	8	43,3	46,1	4197,31	52,47	4367,27	54,59	28 465	31 490
A	9	44,6	53,1	4348,70	53,29	4864,65	59,62	28 159	
A	10	50,1	52,4	4601,01	57,66	4740,62	59,41	27 971	29 953
A	11	50,7	52,6	4238,79	59,70	4354,12	61,33	27 492	32 082
A	12	44,9	47,3	4194,77	53,92	4340,45	55,79	26 339	23 094
A	13	42,8	44,4	3800,03	52,85	3897,15	54,20	26 222	26 228
A	14	40,5	40,8	4163,25	50,16	4181,46	50,38	22 919	26 293
Moyenne		43,17	47,29	3 974,01	52,71	4 223,74	56,03	30 718,39	31 689,65
Ecart type		5,66	5,40	515,29	4,49	515,60	4,05	5 621,04	6 142,93
Min		32,8	37,9	2880,46	44,31	3190,03	49,08	22919,05	23093,57
Max		52,3	56,2	4788,91	59,70	5025,64	62,04	45547,76	46039,83

Tableau 9 Résultats des sujets du groupe Athlétisme

Sport	Sujet N°	SJ	CMJ	Puissance maximale développée au SJ	Puissance relative développée au SJ	Puissance maximale développée au CMJ	Puissance relative développée au CMJ	Raideur K sur sauts établis sur les sauts maximaux	Raideur K établi sur les sauts sous-maximaux
		(cm)	(cm)	(W)	(W.kg ⁻¹)	(W)	(W.kg ⁻¹)	kN.m ⁻¹	kN.m ⁻¹
B	15	36,9	35,9	4293,54	47,34	4232,84	46,67	37933	38139
B	16	38,6	44,6	4745,54	48,23	5109,74	51,93	33996	34463
B	17	32,6	39	3257,90	44,26	3646,38	49,54	29676	39720
B	18	38,2	42,1	3933,04	48,56	4169,77	51,48	27805	27927
B	19	38,4	35,9	3446,88	49,24	3295,13	47,07	26375	25095
B	20	36,7	43,3	3420,70	47,71	3821,32	53,30	24918	39907
B	21	27,1	31,4	2190,19	38,16	2451,20	42,70	24613	24877
B	22	36,4	39,8	2473,84	48,32	2680,22	52,35	23143	27211
B	23	36,3	43,3	4003,44	47,04	4428,34	52,04	21784	30610
B	24	32,9	41,7	3171,92	44,49	3706,08	51,98	21725	31580
B	25	37,5	41,5	3650,46	48,22	3893,26	51,43	21372	37889
B	26	37,1	39,3	3676,01	47,86	3809,55	49,60	20695	25459
B	27	39,8	41,5	3377,84	50,72	3481,03	52,27	20129	30519
B	28	34,4	35	3403,40	45,74	3439,82	46,23	19385	32942
B	29	31,6	35,2	2957,11	43,30	3175,63	46,50	18945	25306
B	30	38,7	42,7	3070,98	50,10	3313,78	54,06	16956	31982
B	31							16343	28208
B	32	36,4	39,8	2473,84	48,32	2680,22	52,35	15140	27445
Moyenne		35,86	39,53	3385,10	46,92	3607,90	50,09	23385	31071
Ecart type		3,22	3,67	659,13	3,02	674,92	3,15	6030	5150
Min		27,1	31,4	2190,19	38,16	2451,20	42,70	15140	24877
Max		39,8	44,6	4745,54	50,72	5109,74	54,06	37933	39907

Tableau 10 Résultats des sujets du groupe Basket-ball

Sport	Sujet N°	SJ	CMJ	Puissance maximale développée au SJ	Puissance relative développée au SJ	Puissance maximale développée au CMJ	Puissance relative développée au CMJ	Raideur K sur sauts établis sur les sauts maximaux	Raideur K établi sur les sauts sous-maximaux
		(cm)	(cm)	(W)	(W.kg ⁻¹)	(W)	(W.kg ⁻¹)	kN.m ⁻¹	kN.m ⁻¹
V	33	39,5	43,8	3327,92	50,50	3588,93	54,46	26684	23218
V	34	36,4	41,8	3764,89	47,24	4092,67	51,35	25786	24631
V	35	40,2	44,7	3311,52	51,26	3584,67	55,49	25084	15820
V	36	47,3	53,6	4181,90	56,28	4564,31	61,43	23588	30127
V	37	35,5	35,7	4108,90	46,43	4121,04	46,57	23583	29275
V	38	32,9	37,5	3461,84	44,55	3741,06	48,15	21949	19317
V	39	33,3	35,7	3336,63	44,85	3482,31	46,81	17463	
Moyenne		37,9	41,8	3641,94	48,73	3882,14	52,04	23448	23731
Ecart type		5,0	6,4	378,19	4,22	391,79	5,46	3075	5564
Min		32,9	35,7	3311,52	44,55	3482,31	46,57	17463	15820
Max		47,3	53,6	4181,90	56,28	4564,31	61,43	26684	30127

Tableau 11 Résultats des sujets du groupe Volley-ball

Athlétisme								
	SJ (cm)	Puissance maximale au SJ (W)	Puissance relative au SJ ($W.kg^{-1}$)	CMJ (cm)	Puissance maximale au CMJ (W)	Puissance relative au CMJ ($W.kg^{-1}$)	Raideur K sur les sauts maximaux ($N.m^{-1}$)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N.m^{-1}$)
Raideur K sur les sauts maximaux ($N.m^{-1}$)	0,231	-0,336	-0,221	0,103	0,081	0,182	1	0,854
Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N.m^{-1}$)	-0,004	-0,045	0,036	0,195	0,045	0,227	0,854	1

Tableau 12 Coefficient de corrélation de rang de Spearman au sein du groupe Athlétisme

Basket-ball								
	SJ (cm)	Puissance maximale au SJ (W)	Puissance relative au SJ ($W.kg^{-1}$)	CMJ (cm)	Puissance maximale au CMJ (W)	Puissance relative au CMJ ($W.kg^{-1}$)	Raideur K sur les sauts maximaux ($N.m^{-1}$)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N.m^{-1}$)
Raideur K sur les sauts maximaux ($N.m^{-1}$)	0,055	0,521	-0,118	0,1	0,494	-0,0234	1	0,296
Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N.m^{-1}$)	0,136	0,412	-0,074	0,42	0,611	0,236	0,296	1

Tableau 13 Coefficient de corrélation de rang de Spearman au sein du groupe Basket-ball

Volley-ball								
	SJ (cm)	Puissance maximale au SJ (W)	Puissance relative au SJ ($W \cdot kg^{-1}$)	CMJ (cm)	Puissance maximale au CMJ (W)	Puissance relative au CMJ ($W \cdot kg^{-1}$)	Raideur K sur les sauts maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N \cdot m^{-1}$)
Raideur K sur les sauts maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	0,642	-0,214	0,642	0,612	0,142	0,571	1	-0,085
Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	0,2	0,94	0,2	0,028	0,942	0,028	-0,085	1

Tous								
	SJ (cm)	Puissance maximale au SJ (W)	Puissance relative au SJ ($W \cdot kg^{-1}$)	CMJ (cm)	Puissance maximale au CMJ (W)	Puissance relative au CMJ ($W \cdot kg^{-1}$)	Raideur K sur les sauts maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N \cdot m^{-1}$)
Raideur K sur les sauts maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	0,376	0,448	0,308	0,464	0,504	0,366	1	0,345
Raideur K sur les sauts sous-maximaux ($N \cdot m^{-1}$)	0,044	0,189	-0,019	0,149	0,27	0,11	0,345	1

Tableau 14 Coefficient de corrélation de rang de Spearman pour l'ensemble de nos résultats

Tableau 15 Coefficient de corrélation de rang de Spearman au sein du groupe Volley-ball

Sport		Sexe	Age	Taille	Poids	IMC
Saut en longueur	Sujet 1	M	18	1,71	67	22,9130331
	Sujet 2	M	18	1,81	71,9	21,946827
	Sujet 3	M	23	1,75	71	23,1836735
	Sujet 4	M	25	1,81	81	24,72452
	Moyenne		21,0	1,8	72,7	23,2
	Ecart-type		3,56	0,05	5,91	1,15

Tableau 16
Caractéristiques physiques du groupe saut en longueur

Caractéristiques physiques du groupe saut en longueur

	Date	Saut		Puissance maximale développée au SJ	Puissance relative développée au SJ	Puissance maximale développée au CMJ	Puissance relative développée au CMJ
		SJ cm	CMJ cm				
Sujet 1	05/10/2015	46,1	47,9	3778,37	56,39	3887,63	58,02
	04/11/2015	45,1	47	3717,67	55,49	3833,00	57,21
	01/12/2015	45	40,7	3711,60	55,40	3450,59	51,50
	16/03/2016	42,7	43,5	3571,99	53,31	3620,55	54,04
Sujet 2	05/10/2015	42,2	43,3	3763,61	52,35	3830,38	53,27
	04/11/2015	44,1	45,8	3878,94	53,95	3982,13	55,38
	01/12/2015	44,1	44,1	3878,94	53,95	3878,94	53,95
	16/03/2016	42,8	44,4	3800,03	52,85	3897,15	54,20
Sujet 3	05/10/2015	48,8	49,7	4123,46	58,08	4178,09	58,85
	04/11/2015	48,8	50,1	4123,46	58,08	4202,37	59,19
	01/12/2015	50,5	52,6	4226,65	59,53	4354,12	61,33
	16/03/2016	50,7	52,6	4238,79	59,70	4354,12	61,33
Sujet 4	05/10/2015	56,7	56,3	5055,99	62,42	5031,71	62,12
	04/11/2015	52,6	51,6	4807,12	59,35	4746,42	58,60
	01/12/2015	53,6	53,6	4867,82	60,10	4867,82	60,10
	16/03/2016	52,3	56,2	4788,91	59,12	5025,64	62,04
	Moyenne	47,88	48,71	4145,83	56,88	4196,29	57,57
	Ecart-type	4,48	4,84	480,35	3,07	494,93	3,44
	Min	42,20	40,70	3571,99	52,35	3450,59	51,50
	Max	56,70	56,30	5055,99	62,42	5031,71	62,12

Tableau 17 Évolution des différents résultats de sauts chez les sauteurs en longueur

	Date	SJ	CMJ	Rebonds maximaux		Raideur
		cm	cm	Tvol	T con	N.m ⁻¹
Sujet 1	05/10/2015	46,1	47,9	0,581	0,157	32084,3244
	04/11/2015	45,1	47	0,584	0,184	24128,9946
	01/12/2015	45	40,7	0,546	0,187	23651,9158
	16/03/2016	42,7	43,5	0,550	0,160	31385,5736
Sujet 2	05/10/2015	42,2	43,3	0,595	0,204	21422,224
	04/11/2015	44,1	45,8	0,597	0,213	19645,1285
	01/12/2015	44,1	44,1	0,564	0,200	22292,1003
	16/03/2016	42,8	44,4	0,499	0,185	26326,506
Sujet 3	05/10/2015	48,8	49,7	0,616	0,176	27476,7439
	04/11/2015	48,8	50,1	0,603	0,187	24654,1101
	01/12/2015	50,5	52,6	0,620	0,172	28648,6941
	16/03/2016	50,7	52,6	0,604	0,176	27494,6377
Sujet 4	05/10/2015	56,7	56,3	0,629	0,205	23655,9829
	04/11/2015	52,6	51,6	0,551	0,209	23342,9074
	01/12/2015	53,6	53,6	0,606	0,223	20330,809
	16/03/2016	52,3	56,2	0,596	0,172	32790,3531

Tableau 18 Évolution de la raideur chez les sauteurs en longueur

Groupe saut en longueur						
	SJ (cm)	Puissance relative au SJ (W.kg ⁻¹)	CMJ (cm)	Puissance relative au CMJ (W.kg ⁻¹)	Temps de contact au sol (s)	Raideur K sur les sauts maximaux (N.m ⁻¹)
Raideur K sur les sauts maximaux (N.m ⁻¹)	0,466	0,487	0,519	0,53	-0,896	1

Tableau 19 Coefficient de corrélation de rang de Spearman pour le groupe de saut en longueur

Résumé

Objectif – Le but de cette étude est de vérifier, s’il existe une relation entre la raideur musculotendineuse et la puissance musculaire chez des sujets de différents niveaux, pratiquant différentes activités. De plus, l’évolution de la raideur a été analysée, afin de déterminer dans quelle mesure l’entraînement peut l’impacter.

Méthode – Pour mesurer la raideur, une méthode simple, nécessitant uniquement le temps de contact et le temps de vol a été utilisée. 39 sujets, dont 14 sujets de haut niveau pratiquant l’athlétisme (A), 18 sujets pratiquant le basket-ball à un niveau régional (B) et 7 sujets pratiquant le volley-ball à un niveau régional (V) ont effectué différents sauts. Le Squat Jump (SJ) et le Contre Mouvement Jump (CMJ) ont été utilisés pour calculer la puissance relative et maximale des sujets. Les rebonds maximaux (RJM) et sous maximaux (RJSM) ont été utilisés pour déterminer la raideur de sujets. Des comparaisons, entre la raideur des RJM et des RJSM et les puissances en SJ et CMJ, ont été faites pour chacun de nos groupes.

Résultats – La puissance moyenne de nos sujets était $49,45 \pm 3,91 \text{ W.kg}^{-1}$ au SJ et $52,72 \pm 4,22 \text{ W.kg}^{-1}$ au CMJ. La raideur moyenne était de $26\,028 \pm 6\,419 \text{ N.m}^{-1}$ lors des RJM et $30\,028 \pm 6\,113 \text{ N.m}^{-1}$ lors de RJSM. Nous observons une différence de raideur entre les RJM et les RJSM. Cette étude montre qu’il n’existe pas de corrélation entre la puissance et la raideur dans le groupe A et B. Cependant, nous obtenons une forte corrélation entre la puissance maximale au SJ et au CMJ et les RJSM dans le groupe V ($r=0,940$ et $0,942$; $p<0,05$). Finalement, l’évolution de la raideur montre une diminution de celle-ci lors des différents cycles d’entraînement et une augmentation en période de compétition.

Conclusion – Uniquement la puissance maximale lors des tests de sauts est fortement corrélée à la raideur dans le groupe V. Cette corrélation ne se retrouve pas dans le groupe A et B, ce qui permet de dire que la raideur n’est pas un facteur discriminant dans tous les sports. Cependant le test de mesure de la raideur, peut être intéressant pour une évaluation plus spécifique de certains groupes de sportifs. Compte tenu des résultats supérieurs lors des RJSM, il serait intéressant de favoriser des sauts en fréquence pour déterminer la raideur du sportif. De plus, l’analyse de la raideur, durant les différents cycles d’entraînements, met en évidence une évolution qui suit la logique de la planification. Il serait donc intéressant de mener de plus amples recherches, pour déterminer si le test de la raideur permet d’illustrer l’état de forme d’un athlète et donc par conséquent, être un outil de feedback de l’entraînement.

Mots clés : Entraînement ; Puissance ; Raideur ; Sauts

Abstract

Goal – The aim of this study was to evaluate, if the muscle tendon stiffness is correlated to the power output of athletes of different sports and different level. Furthermore, the evolution of the stiffness has been analysed to determinate, how important the impact of training is.

Method – A simple method, requiring the ground contact time and the flight time, has been used to calculate the stiffness. 39 subjects (14 elite track and field athletes (A), 18 regional basketball player (B) and 7 regional volleyball players (V)) realized several jumps. Squat Jumps (SJ) and Counter Mouvment Jumps (CMJ) were used to determinate the peak power of our subjects. Maximal Rebound Jumps (RJM) and Submaximal Rebound Jumps (RJSM) were used to determinate the stiffness. The relationship between RJM, RJSM and SJ, CMJ has been observed for all of our groups.

Results – The average power of our subjects was $49,45 \pm 3,91 \text{ W.kg}^{-1}$ for the SJ and $52,72 \pm 4,22 \text{ W.kg}^{-1}$ for the CMJ. The value of the stiffness was $26\,028 \pm 6\,419 \text{ N.m}^{-1}$ for the RJM and $30\,028 \pm 6\,113 \text{ N.m}^{-1}$ for the RJSM. The main result of the study was, that no relationship has been found between the power output and the stiffness for the group A and B. However, there is a strong relationship between the peak power value and the stiffness for the group V ($r=0,940$ and $0,942$; $p<0,05$). Finally, the evolution of the stiffness shows a rise of the value during different training cycle and a peak immediately after the season.

Conclusion – The power measured during single jump is correlated only for the group V. This relationship cannot be found for the group A and B. The stiffness measurement can be used to evaluate the level of athletes in specific sport activities. Due to the difference of the results shown for the RJM and RJMS, it can be interesting to encourage submaximal jumps to determinate the stiffness of the athletes. Furthermore the analysis of the stiffness during different training cycles, shows that there is a relationship similar to the logic of exercise periodization. It would be interesting to continue more detailed researched to find out if the stiffness measurement can be used as a training feedback tool.

Keywords : Exercise; Power; Stiffness; Jumps