

Monitoring d'un entraînement en force excentrique isocinétique pendant quatre semaines des membres supérieurs pour améliorer les éléments de force aux anneaux.

Etude avec des gymnastes du cadre national Suisse

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de
Master of Science en sciences du sport
Option enseignement

Déposé par

Océane Evard

à

l'Université de Fribourg, Suisse

Faculté des sciences

Département de médecine

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent

Dr. Silvio Lorenzetti

Conseiller

Christoph Schärer

Villiers, mai 2019

Table des matières

Résumé.....	3
1 Introduction	4
1.1 La gymnastique artistique masculine	4
1.2 Le contrôle et l'évaluation de la charge d'entraînement	5
1.3 La force maximale.....	6
1.4 La méthode de « Cluster ».....	7
1.5 L'entraînement excentrique.....	8
1.6 Les objectifs du travail	13
2 Méthode.....	14
2.1 Echantillon	14
2.2 Plan de l'étude	14
2.3 Instrument, procédés de mesure, évaluation et analyse statistique	16
3 Résultats	18
3.1 La Force maximale (Fmax)	18
3.2 La Force moyenne (Fmoy)	19
3.3 Le Temps sous tension (TpsT)	20
4 Discussion	21
4.1 La force maximale (Fmax).....	21
4.2 La force moyenne (Fmoy).....	22
4.3 Le temps sous tension (TpsT)	23
5 Conclusion.....	27
Bibliographie	28
Annexes	35
Remerciements	40

Résumé

Introduction. Il est très difficile de varier les entraînements et la charge afin de développer la force maximale relative des membres supérieurs pour présenter d'avantage d'éléments de force aux anneaux en gymnastique artistique, mais nous savons à présent que l'entraînement excentrique isocinétique sur l'appareil 1080 Quantum Synchro est un bon moyen. Cette étude est la première à analyser la qualité et le développement de la charge mais aussi leurs impacts sur l'évolution de la force excentrique (progrès et fatigue).

Objectifs. Les buts de ce travail sont d'évaluer l'effet immédiat et à court terme de quatre semaines d'entraînements de force maximale spécifique (excentrique isocinétique) sur le développement de la force excentrique isocinétique (force maximale (F_{max}), endurance en force maximale (force moyenne (F_{moy}) des répétitions entières)) mais aussi la qualité des répétitions (temps sous tension (TpsT)) afin d'optimiser le programme d'entraînement.

Méthode. Neuf gymnastes du cadre nation suisse ont effectué huit entraînements (deux par semaine) de force maximale excentrique isocinétique sur l'appareil 1080 Quantum Synchro avec la variation de charge selon la méthode de « Cluster ». La moyenne et les écarts-types de la F_{max} , F_{moy} et du TpsT à $>50\%$ et à $>80\%$ de la F_{max} par série et par entraînement sont déterminés (au total : 560 répétitions par gymnaste).

Résultats. La F_{max} s'est améliorée jusqu'à l'entraînement 5 et a obtenu des différences significatives ($p < 0.05$) lors des entraînements 4 et 5 par rapport au 1^{er}, par contre la F_{moy} est restée plutôt constante. La F_{max} et la F_{moy} ont diminué significativement surtout lors des sessions composées de 3 séries. Le TpsT total (à $>50\%$ et $>80\%$ de la F_{max}) a toujours diminué entre le 1^{er} entraînement et le deuxième de la même semaine mais aussi après chaque série de 3 à 14 %.

Discussion. Avec la méthode de « Cluster », la F_{max} et la F_{moy} ont été maintenues jusqu'à la fin des entraînements de 2 séries mais avec 3 séries, un effet de fatigue s'est fait ressentir qui a entraîné un stimulus suivi d'une adaptation (augmentation significative de la F_{max} après T3 et T4). Par contre, après le 5^{ème} entraînement, une fatigue générale s'est produite. Le TpsT et les répétitions ont aussi diminué avec la fatigue entre les séries de la 2^{ème} session hebdomadaire.

Conclusion. Ce programme a entraîné une augmentation de la F_{max} . Le suivi des répétitions, séries et entraînements a toutefois montré que le pic d'adaptation a déjà eu lieu après 5 sessions et qu'il faudrait donc adapter la durée (nombre de semaine et d'entraînement) lors de nouvelles interventions. Concernant le TpsT, une meilleure standardisation du mouvement devrait être mise en place afin que toutes les répétitions aient la même longueur. Comme ça, on peut vraiment prévoir à quelle charge sont soumis les athlètes et donc mieux la planifier.

1 Introduction

1.1 La gymnastique artistique masculine

La gymnastique artistique masculine est une discipline olympique qui exige des performances artistiques et esthétiques particulièrement élevées. Il faut énormément de rigueur, de courage et beaucoup de volonté. Elle se situe dans la catégorie des activités morpho-cinétiques (reproduction de formes ou d'actions corporelles codifiées et jugées) où le gymnaste passe sur six engins (sol, cheval d'arçons, anneaux, saut, barres parallèles et barre fixe) en effectuant des suites d'éléments statiques ou dynamiques. Chaque agrès demande un certain nombre de contraintes (configuration, consistance, dureté, souplesse). Le gymnaste devra être capable d'y répondre de la meilleure manière avec des actions musculaires spécifiques (impulsion, antéimpulsion, rétroimpulsion, abduction, adduction, etc.) (Pozzo & Studeny, 1987). Les compétitions sont réglementées par le « code de pointage » de la Fédération internationale de gymnastique (FIG, 2017) qui détermine la valeur de chaque élément présent dans les exercices. Deux notes sont données par engin. La première représente la note de difficulté qui évalue le contenu de l'enchaînement composé de la valeur de difficulté (D) des éléments, de leurs catégories (A à H) ainsi que de l'exigence de groupe d'éléments. La seconde est une note d'exécution (E) qui évalue la performance globale (fautes techniques, d'exécutions, de tenue du corps et d'esthétisme). La somme des deux correspond à la note finale. Plus les gymnastes effectuent des mouvements difficiles avec des enchaînements complexes, plus la valeur D sera haute et plus leur chance de succès lors des concours sera élevée (FIG, 2017).

Dans cette étude, l'intérêt principal se porte sur les anneaux qui se définissent comme l'engin le plus instable en gymnastique (Bango, Navandar, Grande & Sillero-Quintana, 2017). Les gymnastes se distinguent à plus de 2.75 mètres du sol et démontrent des suites d'éléments de force (quasi-)isométrique, d'immobilisation et d'équilibre (Jemni, Friemel, Le Chevalier & Origas, 1998) qui peuvent demander des contractions musculaires concentriques ou excentriques. Dans ce travail, seule la contraction excentrique est utilisée car il y a des similitudes d'action musculaire (par ex : surmonter la gravité tout au long du mouvement) avec ces éléments quasi-statiques. L'exercice complet est composé d'un maximum de huit éléments de force (quatre de force et maintien ainsi que quatre d'élan) (FIG, 2017). Les éléments tels que l'hirondelle ou l'appui facial horizontal sont des mouvements qui représentent une valeur D très élevée (FIG, 2017). Pour Campos (2009) et Gorosito (2013), l'hirondelle, l'appui facial horizontal, la croix et la croix renversée sont les éléments de force les plus importants lorsque l'on veut présenter

un enchaînement difficile. Cependant, ces mouvements demandent une force maximale relative (rapport entre la force maximale et le poids du corps) très élevée au niveau des membres supérieurs et d'excellentes capacités d'équilibre afin de maintenir une position statique (Bango, Silero-Quintana & Grande, 2013 ; Dunlavy et al., 2007 ; Schärer & Hübner, 2016).

1.2 Le contrôle et l'évaluation de la charge d'entraînement

Contrôler, mesurer et évaluer les différents facteurs (charge d'entraînement, condition physique, technique, psyché) agissant sur la performance permet à l'athlète d'évoluer dans les meilleures conditions. Ces connaissances aident l'entraîneur à planifier le processus d'entraînement et permettent à l'athlète d'augmenter sa performance constamment (Bango et al., 2013).

Plus spécifiquement, le diagnostic de la force permet d'ajuster le profil de performance de l'athlète (par ex : ses points forts ou ceux à développer), de savoir si les entraînements sont efficaces (courbe de progrès), de fixer des objectifs à court et long termes mais aussi pour prévenir les blessures. Pour une bonne planification d'entraînement, il faut varier les séances de manière logique afin de stimuler les athlètes et améliorer leur performance (Plisk & Stone, 2003). Il est possible par exemple de modifier la charge globale, le type de contraction musculaire, le nombre de répétitions, le temps de pause et le support utilisé. Pour Hodges, Hayes, Horn et Williams (2005), varier et faire évoluer les plannings d'entraînement permettent à l'athlète d'accroître ses performances et de s'adapter aux différents exercices plus rapidement. La méthode la plus courante pour mesurer la force maximale est d'employer l'évaluation simple et rapide d'une répétition maximale (1-RM). L'intensité de la charge d'entraînement correspond au pourcentage de celle-ci (% 1-RM) (Brechue & Mayhew, 2009). Selon Hübner et Schärer (2015), afin de réussir les éléments de maintien et de force aux anneaux, une valeur élevée d'1-RM est une condition à ne pas négliger dans certains exercices. Selon Maier et al. (2016) pour mesurer ce facteur, trois types de tests sont utilisés. Premièrement, les tests de force isoinertiel sont représentés par l'accélération ou la décélération d'une masse constante (par ex. : lancer un objet, résister à la charge la plus lourde ou la ralentir). L'exercice idéal et facile à mesurer pour le haut du corps est le développé couché (Maier et al., 2016). Deuxièmement, la méthode isométrique se déroule dans la position statique (longueur du muscle constant). Le but ici est sans mouvement, pousser le plus fort possible contre une résistance fixe (par ex. : une barre fixe). Le dernier type de test est la méthode isocinétique (vitesse permanente) qui est pratiquée à l'aide d'appareils d'isocinétisme (par ex. : le dynamomètre).

De manière générale, une programmation pertinente doit non seulement impliquer une surcharge mais elle ne doit pas être combinée à une récupération insuffisante (Meeusen et al.,

2013). Pour cela, il est indispensable de quantifier et surveiller la charge d'entraînement qui est représentée de manière externe par les paramètres de l'exercice (durée, intensité, volume) (Platonov, 1988), pouvant être surveillés par la distance parcourue, le temps total de l'effort, le poids soulevé, le pourcentage d'une répétition maximale (% 1-RM), mais aussi grâce à des outils plus récents tels que les accéléromètres tridimensionnels, les GPS ou les dynamomètres. En plus de cette charge externe, il a également une charge interne qui correspond à l'ensemble des adaptations positives et négatives de l'organisme ressenti par l'athlète face à la charge externe (Platonov, 1988). Pour la mesurer, on va plutôt utiliser des questionnaires de ressenti, l'échelle de perception de l'effort (RPE), l'échelle de Borg (Borg, 1982) ou tenir compte de variables physiologiques (fréquence cardiaque, lactatémie).

1.3 La force maximale

La force fait partie des qualités physiques majeure qu'un gymnaste doit acquérir (Bango et al., 2017). La force musculaire est définie comme l'activité musculaire engagée afin d'accélérer, de ralentir ou de stabiliser (contre la gravité) son corps ou un objet en opposant les résistances (Maier et al., 2016). La force produite (par ex. : force-vitesse, force-endurance, force maximale) est différente en fonction des aspects trophiques du muscle (densité des myofilaments, le nombre de myofibrilles, le type de fibres musculaires (I, IIA ou IIB), de la transmission des forces (organisation des fibres dans le muscle, le bras de levier) et du contrôle nerveux (type et nombre d'unités motrices)) (Chan, Maffulli, Korkia & Li, 1996 ; Monod & Flandrois, 2000). Selon Weineck (1999) la force maximale représente la capacité du système neuromusculaire à utiliser le maximum de force lors d'une contraction maximale volontaire et dépend de la coordination intermusculaire (entre les muscles) et intramusculaire (à l'intérieur du muscle sollicité). Ce type de force peut-être isométrique (la plus grande contraction volontaire contre une résistance insurmontable) ou dynamique (la plus grande force déployée lors de la réalisation d'un mouvement) (Frey, 1977). La contraction musculaire est caractérisée par différents facteurs comme le type de fibres musculaires ou le nombre de filaments d'actine et de myosine utilisés mais également selon la force exercée sur le muscle, la direction et l'amplitude du mouvement (Marconnet & Komi, 1988). Si le muscle se raccourcit lors de la tension, on parle de contraction concentrique, lorsqu'il s'allonge, le régime sera excentrique et quand la force générée produit aucun mouvement, l'action est dite isométrique (Marconnet & Komi, 1988 ; Perrey, 2009).

La gymnastique artistique est une discipline où la sensation interne du mouvement est très importante. Il est donc fondamental d'entraîner les différents facteurs de condition physique de

manière à être le plus proche de l'élément demandé (travailler dans une position similaire et à une intensité appropriée). Plus spécifiquement aux anneaux, lors de l'exécution d'éléments statiques, la contraction musculaire employée est différente de celles expliquées précédemment. Pour maintenir une position statique et stable avec les bras tendus pendant au moins 2 secondes comme exigé par le code de pointage (FIG, 2017), les gymnastes doivent fournir un travail de freinage très spécifique avec les membres supérieurs afin de ralentir le plus lentement possible la chute du corps et maintenir une position statique et stable sinon il y a des déductions sur la note (E). Ce type de travail peut-être donc considéré comme similaire à une contraction excentrique. Par contre, l'exécution d'exercices de force excentrique à cet agrès peut-être dangereux car les gymnastes doivent toujours contrôler la position des anneaux qui sont très instables afin de ne pas perdre l'équilibre lors du mouvement. En général, les gymnastes s'entraînent avec une aide afin de tenir plus longtemps la position idéale, augmenter la force maximale relative (Mironov & Schinkar, 1995) et produire un mouvement de meilleure qualité (Schärer & Hübner, 2016). Ce soutien peut provenir de l'entraîneur qui suit et accompagne le gymnaste durant le mouvement ou d'un contrepoids qui diminue ou augmente le poids à soulever (résistance maximale). A côté de cela, sans être sur l'engin, des exercices concentriques spécifiques avec haltères peuvent être effectués ou des contractions isométriques (Hübner & Schärer, 2015). Des entraîneurs ont essayé d'utiliser dans le programme d'entraînement, des exercices excentriques dans des conditions isoinertielles (charge constante) mais cette méthode a provoqué des douleurs et blessures aux épaules des gymnastes. C'est pourquoi dans l'étude de Schärer et al. (2018), ils ont voulu utiliser l'entraînement excentrique non pas avec une charge constante mais avec une vitesse constante (isocinétique) qui a pour but de soulager les athlètes.

1.4 La méthode de « Cluster »

Généralement, en musculation, lorsque les athlètes travaillent un exercice de renforcement, ils font une pause seulement entre les séries et gardent une intensité continue entre les répétitions (Fleck & Kraemer, 1997 ; Haff et al., 2003). Une méthode d'entraînement peu connue a été utilisée dans l'étude de Schärer et al. (2018), afin de développer la force maximale des muscles du haut du corps des gymnastes. Elle se nomme méthode de « Cluster » ou « Rest-pause » (Fleck & Kraemer, 1997). Elle a comme objectif d'amplifier le volume et la force maximale du muscle en utilisant des charges lourdes. La particularité de celle-ci est d'intégrer au sein d'une série des petites pauses entre 10 et 30 secondes qui ont pour but d'accroître le nombre de répétitions et leurs qualités (force maximale). L'athlète doit donc exercer un grand nombre de fois des charges proches du 1-RM. L'utilisation d'intervalles de repos courts augmente la qualité du

mouvement et diminue la fatigue induite par la charge contrairement aux méthodes traditionnelles (Lawton, Cronin, Drinkwater, Lindsell & Pyne, 2004). Rooney, Herbert et Balnave (1994) confirment que l'ajout de courtes pauses diminue la fatigue liée à la répétition mais a moins d'effet sur le développement de la résistance que les entraînements traditionnels. Ces intervalles de repos aident également à la reconstitution des réserves de phosphocréatine (PCr) alors que les méthodes classiques puisent dans le stock de PCr, ce qui augmente le taux d'acide lactique dans le muscle et donc diminue la force (Haff et al., 2003). Selon les travaux de Sahlin et Ren (1989), intégrer 15 secondes de récupération entre les répétitions augmente de $79.7 \pm 2.3\%$ la capacité maximale de production de force par rapport aux dispositions initiales. Pour Kraemer, Fleck & Evans (1996) l'utilisation de courtes pauses est intéressante pour augmenter la puissance explosive alors que les méthodes classiques sont plus bénéfiques pour développer la force maximale ou l'hypertrophie musculaire. Jusqu'à présent, la méthode de « Cluster » a été utilisée lors d'entraînement de force, principalement pour développer la force maximale et augmenter les capacités musculaires en contraction concentrique mais n'a encore jamais été appliquée sur un entraînement de force excentrique isocinétique.

1.5 L'entraînement excentrique

Selon Gorosito (2013) retenir son propre poids est l'obstacle principal des athlètes lors de leur production aux anneaux. A rappeler qu'à cet agrès, un travail de freinage est engagé par les muscles du haut du corps (force excentrique) lors de l'hirondelle et de l'appui facial horizontal afin de maintenir la position statique et pour empêcher la chute du corps. Middleton et Montero (2004) définissent le travail excentrique comme une contraction musculaire combinée à un allongement du complexe musculo-tendineux. Lorsque le muscle travaille de cette manière, il s'oppose à une force externe. Par opposition à la contraction concentrique du muscle agoniste qui est effecteur du mouvement, le travail excentrique est également nommé freinateur ou négatif afin de ralentir le mouvement et de protéger l'articulation (Croisier, Maquet, Crielaard & Forthomme, 2009). Grâce au phénomène de coactivation musculaire, le mouvement est réalisé par la contraction concentrique de l'agoniste et en même temps, la contraction excentrique de l'antagoniste qui le freine (Roulland, 2003). Théoriquement, selon Linari et al. (2000), l'augmentation de la production de force durant l'allongement du muscle est expliquée par l'activation d'une deuxième tête de myosine, ce qui double le nombre d'attache au pont et permet d'engendrer une force élevée. C'est un type de contraction musculaire qui montre une activité corticale élevée au niveau du système nerveux central, n'utilisant pas de phosphagènes cellulaires (ATP + CP) et n'augmentant pas la vascularisation locale (Middleton, Puig, Trouve, Roulland &

Fleury, 1993). Il recrute principalement les fibres rapides de type IIB (Middleton et al., 1993). Selon Westing et Seger (1989), plus le pourcentage de ce type de fibre est élevé, plus la puissance maximale produite est grande et ceci sans aucun rapport avec la vitesse du mouvement. Ce type d'entraînement est principalement effectué avec des charges très lourdes afin de provoquer un étirement du muscle lors de la contraction maximale. Pour Chabloz (2016), l'intensité appropriée se situe entre 100 et 120% d'1-RM. Celle-ci augmente progressivement et est développée que vers la fin de l'étirement. Une fois que la charge maximale est atteinte, un mécanisme de défense stimulant les neurones de Golgi se déclenche et provoque une chute brutale de la force. Patton, Sundstein, Crill & Swanson (1976) l'appellent le « Claps Knife Reflex ». La force maximale développée par le groupe musculaire mobilisé est supérieure à la contraction concentrique (Kellis & Baltzopoulos, 1995 ; Hedayatpour & Falla, 2015) et utilise également moins d'unités motrices (Cowell, Cronin & Brughelli, 2012), ce qui provoque un stress plus élevé par unité motrice (Armstrong, Ogilvie & Schwane, 1983). L'action excentrique est aussi meilleure d'un point de vue neuromusculaire (Eloranta & Komi, 1980 ; Komi, Kaneko & Aura, 1987) mais par contre génère plus de douleurs musculaires retardées (courbatures) que le concentrique (Ebbeling & Clarkson, 1989). Ce type de contraction est donc très intéressant pour développer l'hypertrophie musculaire (Hather, Tesch, Buchanan & Dudley, 1991) et améliorer la coordination intramusculaire et la force maximale car l'entraînement est plus économique (Guilhem, Cornu & Guével, 2010). Par contre, de manière générale, le taux d'augmentation de la force est différent entre un débutant ou un athlète d'élite qui travaille depuis longtemps en musculation (Kraemer & Fleck, 1988). Les athlètes sont moins sensibles au stimulus et montrent donc un gain de force plus lent (Giorgi, Wilson, Weatherby & Murphy, 1998 ; Häkkinen, Komi, Alen & Hauhanen, 1987). Un entraînement approprié en contraction excentrique facilite la cicatrisation des lésions musculaires et aide à la synthèse des protéines. Grâce à l'allongement répétitif de ce mode de contraction, l'alignement des nouvelles fibres par rapport à l'axe de traction est facilité. Il permet également un meilleur développement du collagène et consolide le tissu conjonctif (Fyfe & Stanish, 1992). Suite à un entraînement excentrique intense et inhabituel, plusieurs facteurs provoquant de risques de lésions et douleurs musculaires retardées comme la répétition du travail excentrique, la vitesse et l'amplitude du mouvement mais aussi parfois l'étirement trop élevé du muscle peuvent apparaître (Higino et al., 2016). Les sujets non entraînés ont un plus grand risque de blessure que les athlètes ayant l'habitude de travailler de cette manière (Newton, Morgan, Sacco, Chapaman & Nosaka, 2008). Ces douleurs sont caractérisées par l'augmentation de la créatine kinase, de la troponine et de la myoglobine au niveau intramusculaire (Tee, Bosch & Lambert, 2007), ce qui est négatif pour

la production de force (Isner-Horobeti et al., 2013). Ces douleurs nécessitent une réaction inflammatoire (Coudreuse, Dupond & Nicol, 2007). Elles surviennent dans les 8 heures après l'arrêt de l'activité et s'estompent après 2 à 3 jours (Middleton et al., 1993). Pour Middleton et Montero (2004), en améliorant la force excentrique, l'apparition de lésion musculo-tendineuse est retardée.

1.5.1 L'entraînement excentrique isoinertiel. La sollicitation excentrique isoinertiel consiste au muscle engagé de faire opposition à une charge constante qui après avoir dépassé les capacités de force de l'athlète entraîne un allongement du complexe musculo-tendineux (Brandenburg & Docherty, 2002). Il faut retenir un certain poids qui ne change pas durant tout le mouvement (par ex. : effet de la pesanteur, du poids du corps ou haltères de musculation). Dans ce cas, la vitesse du mouvement varie. Pour Kovalski, Heitman, Trundle et Gilley (1995), le travail excentrique isoinertiel serait plus efficace pour gagner en force qu'avec une contraction excentrique à vitesse constante mais il faudrait 12 à 20 semaines pour voir une augmentation du volume musculaire (Smith & Rutherford, 1995).

1.5.2 L'entraînement excentrique isocinétique. Lors d'un travail excentrique isocinétique, la force employée par l'athlète sert à faire opposition à un mouvement à vitesse constante (Hislop & Perrine, 1967). L'athlète doit appuyer le plus fort possible (sollicitation maximale du système contractile) durant toute la durée de l'exercice. (Guilhem et al., 2010). Ce qui est intéressant à travers l'isocinétisme est l'utilisation maximale du muscle sur la totalité de l'amplitude activant théoriquement une plus grande activité électrique dans le muscle sollicité (Schmitz & Westwood, 2001). Une augmentation du volume musculaire est déjà visible après 8 semaines d'entraînement excentrique isocinétique (Farthing & Chilibeck, 2003). Pour préparer au mieux le complexe musculo-tendineux aux différentes contraintes de la discipline sportive, l'utilisation d'appareils d'isocinétisme (dynamomètre mécanique, magnétique, électronique) en contraction excentrique devient donc intéressant (Hislop & Perrine, 1967). Généralement, ces différentes machines entraînent seulement un groupe musculaire isolé et dans un seul axe. Lors d'un entraînement excentrique isocinétique l'utilisation au maximum, durant tout l'effort, du système contractile, provoque une augmentation de la masse musculaire engagée (hypertrophie), grâce aux adaptations neuromusculaires et musculo-tendineuses (Guilhem et al., 2010). Différentes vitesses, amplitudes et modes de contraction (concentrique ou excentrique) peuvent être choisis en fonction de l'objectif d'entraînement. L'utilisation de cet appareil offre la possibilité d'évaluer et quantifier la force appliquée, la force maximale, le travail total et l'angle

d'efficacité maximale (Croisier, 1998 ; Forthomme, 2005). Cette technique a été réfléchiée pour la première fois par Hislop et Perrine en 1967 aux Etats-Unis (Fossier, 1991 ; Codine, Hérisson & Denat, 2001 ; Edouard, 2011). Les premières études se sont portées sur l'articulation du genou, puis à d'autres articulations et ensuite au développement de la force musculaire (Codine, Bernard, Pocholle & Hérisson, 2005). Le travail en isocinétisme permet une évaluation « *objective, fiable, quantitative et qualitative, reproductible, dynamique, de la force musculaire de deux groupes musculaires effecteurs (agonistes-antagonistes), lors d'un mouvement de rotation, dans une seule direction articulaire, et dans un secteur angulaire ou articulaire déterminé* » (Edouard, 2011, p.78). Cette technique est aujourd'hui utilisée pour la prévention (évaluation de la force), pour le diagnostic ou le suivi (performance), pour la rééducation (renforcement) et pour la recherche clinique. Il y a très peu de contre-indications, tout sujet sain peut travailler avec ce type de machine (Edouard, 2011). Par contre, pour une bonne évaluation excentrique isocinétique, il faut un protocole rigoureux, en utilisant toujours le même dynamomètre, dans les mêmes conditions avec le même échauffement, la même vitesse, les mêmes angles de départ et arrivé et surtout standardiser le temps de pause et de récupération entre chaque série et entraînement (effet de fatigue) (Davies, 1992 ; Wilk, Reinold & Andrews, 2009). Le degré articulaire du mouvement entre l'angle de début et de fin est très important. Il faut qu'il soit pareil avec tous les sujets car le lien entre la longueur et la tension du muscle dépendra de la position de l'athlète et du mouvement articulaire. Concernant la vitesse du mouvement, il n'y a pas de règles mais elle doit se rapprocher le plus possible de l'exercice pratiqué dans les conditions habituelles (Davies, 1992). D'un point de vue technique, l'investissement pour ce type d'équipement et le temps humain nécessaire sont relativement élevés.

Schärer et al. (2018), ont mené une étude sur l'entraînement excentrique à l'aide d'une machine où l'on peut aussi travailler en mode isocinétique, appelée 1080 Quantum Syncro (1080 Motion™, Lindigö, Suède). Contrairement aux dynamomètres courants, cet appareil à résistance linéaire permet un entraînement multi-articulaire. Il a été développé afin d'améliorer les entraînements sportifs (performance) et la rééducation après une blessure ou un traumatisme. Cette machine est dotée de câbles à résistance dynamique avec un centre de commande robotisé qui permet d'évaluer l'augmentation ou la diminution de force face à la résistance lors de différentes phases du mouvement (Whinton, Thompson, Power & Burr, 2018). Les intérêts majeurs de ce type d'appareil sont l'amélioration des entraînements individuels en surveillant chaque session d'entraînement à l'aide d'un ordinateur mais également la possibilité d'utiliser les différents modes de contraction (concentrique ou excentrique) et de varier la vitesse et donc la

durée de contraction. Le mode isocinétique permet un travail à une vitesse très basse et constante, ce qui se rapproche des actions musculaires nécessaires pour maintenir les éléments statiques aux anneaux (hirondelle et appui facial horizontal). Ce qui est très intéressant dans cette présente étude est que la modalité d'entraînement isocinétique excentrique est contrôlée. Il n'y a pas d'accélération lors du mouvement et l'athlète ne doit pas supporter des charges supra-maximales. Le gymnaste doit pousser de manière maximale (force maximale volontaire) contre le mouvement excentrique constant. Contrairement aux méthodes d'entraînement traditionnelles aux anneaux, ce travail isocinétique excentrique permet de bénéficier des effets d'un entraînement excentrique mais dans un cadre très contrôlé. L'inconvénient majeur est qu'il ne se déroule pas sur de vrais anneaux et donc n'est pas aussi spécifique que les méthodes traditionnelles. Pour Croisier (1998), l'utilisation de ce type d'appareil éloigne parfois les athlètes du mouvement technique et des conditions réelles. Néanmoins, le mouvement entraîné se rapproche le plus possible de ces éléments statiques. Cette méthode est nouvelle au sein de la gymnastique artistique, aucun athlète ne s'est déjà entraîné sous cette forme. Ceci peut donc stimuler la musculature des gymnastes d'une nouvelle manière pour augmenter leur force maximale spécifique de la musculature du haut du corps.

Pour le moment, aucunes recherches scientifiques sur l'entraînement excentrique isocinétique de la force maximale spécifique aux anneaux en gymnastique n'ont été publiées. Il n'y a pas eu encore de méthodes idéales ou validées jusqu'à présent. Les entraîneurs planifient donc les programmes pour les gymnastes selon leurs expériences acquises et leurs propres compétences. L'utilisation de l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro en contraction excentrique isocinétique dans ce domaine est ainsi une grande première. Nous savons maintenant, à travers l'étude de Schärer et al. (2018) que ce type d'entraînement avec cette machine augmente la force maximale spécifique du haut du corps lors de l'appui facial horizontal et l'hirondelle mais nous ne savons pas quelle est la structure optimale de l'entraînement afin d'être le plus bénéfique pour l'athlète. C'est pourquoi il est important d'exploiter pleinement les capacités de cette machine et d'analyser chaque répétition, série et entraînement. De cette manière, la qualité et le développement de la charge (temps sous tension à > 50 et à $> 80\%$) et leurs impacts sur l'évolution de la force excentrique (progrès et fatigue) sont observés dans cette présente étude afin d'optimiser le programme d'entraînement pour les prochaines interventions et tirer d'éventuelles conclusions sur l'efficacité de ce mode d'entraînement.

1.6 Les objectifs du travail

Les objectifs de ce travail sont d'évaluer l'effet immédiat et à court terme d'un programme d'entraînement de force maximale spécifique (excentrique isocinétique) sur quatre semaines avec l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro sur le développement de la force excentrique isocinétique (force maximale, endurance en force maximale (force moyenne des répétitions entières)) mais aussi la qualité des répétitions (temps sous tension) afin d'améliorer les éléments de force aux anneaux (hirondelle et d'appui facial horizontal). A cet effet, les questions de recherche suivantes se sont posées :

- a) Comment la force maximale (F_{max}) et l'endurance en force maximale (force moyenne (F_{moy})) en contraction isocinétique excentrique des membres supérieurs changent-elles au cours d'un entraînement excentrique spécifique selon la méthode de « Cluster » par entraînement et par série ?
- b) Comment le temps sous tension (T_{psT}) en contraction isocinétique excentrique des membres supérieurs varie-t-il à $> 50\%$ et à $> 80\%$ de la force maximale lors d'un entraînement excentrique spécifique selon la méthode de « Cluster » par entraînement et par série ?

Afin d'examiner scientifiquement ces questions, j'ai formulé les hypothèses suivantes :

- H1 : La force maximale (F_{max}) et la force moyenne (F_{moy}) des membres supérieurs augmentent significativement entre le premier et le dernier entraînement et diminuent à chaque série du même entraînement.
- H2 : Le temps sous tension (T_{psT}) total des membres supérieurs lors d'une contraction isocinétique excentrique à $> 50\%$ et $> 80\%$ de la force maximale varie en fonction de la charge (nombre de répétition, bloc et série) par entraînement sur les quatre semaines mais diminue à chaque série au sein du même entraînement.

2 Méthode

2.1 Echantillon

Cette étude a été réalisée auprès de neuf gymnastes masculins volontaires ($n=9$) faisant tous partie du cadre national (âge: 21.47 ± 1.96 ans; taille: 169.84 ± 5.47 cm; poids: 69.39 ± 7.00 kg). L'utilisation des données pour ce projet scientifique a été approuvée rétrospectivement par la commission cantonale d'éthique de la recherche de Berne (Project-ID : 2018-00742). L'étude a été menée en accord avec la version actuelle de la déclaration d'Helsinki, ICH-GCP ou EN ISO 14155 et toutes les exigences légales et réglementaires nationales.

2.2 Plan de l'étude

Les données ont été récoltées sur quatre semaines avec l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro avant le début de ce travail. Par la suite, les données des neuf gymnastes ont été retranscrites et analysées. Chaque athlète a effectué 280 répétitions soit 280 à gauche et 280 à droite, ce qui représente une somme de 560 répétitions. Au total, 5040 répétitions englobant les 9 sujets ont été incluses dans les analyses (figure 1).



Figure 1. Evolution phase par phase de l'étude.

Dans le tableau 1 est représenté le protocole des quatre semaines d'entraînement selon la méthode de « Cluster ». A noter que chaque semaine était composée de deux entraînements avec les mêmes nombres de séries et de répétitions. La variation de charge était différente entre les semaines en terme de séries (2 à 3) et de blocs (3 à 4). Par contre le nombre de répétitions était toujours le même (4 répétitions) par bloc. Le temps de pause ne variait jamais (5 min entre les séries et 20 s entre les blocs). Il n'y avait aucune pause entre les répétitions.

Tableau 1

Protocole des quatre semaines d'entraînement excentrique isocinétique avec l'appareil 1080 Quantum Syncro selon la méthode de « Cluster »

Semaine	Séries – blocs - répétitions	répétitions/ semaine
1	2 – 4 – 4 (5min – 20 s – 0 s)	64
2	3 – 3 – 4 (5 min – 20 s – 0 s)	72
3	2 – 3 – 4 (5 min – 20 s – 0 s)	48
4	3 – 4 – 4 (5min – 20 s – 0 s)	96

Note. Les valeurs représentent le nombre de séries, de blocs, de répétitions et la durée des pauses (min et s) lors de l'entraînement excentrique isocinétique en force maximale spécifique.

La figure 2 quant-a-elle, représente le mouvement effectué avec le Quantum Syncro (1080 Motion, Lidingö, Suède) lors des mesures. Les gymnastes sont positionnés sur le dos, couchés sur le banc avec un anneau dans chaque main. La position de départ était bras tendus en antéversion à 50-70°, puis une pression volontaire maximale était demandée contre une vitesse excentrique de 0.1 m/s vers le bas jusqu'à la position finale, bras tendus en rétroversion à 15°.

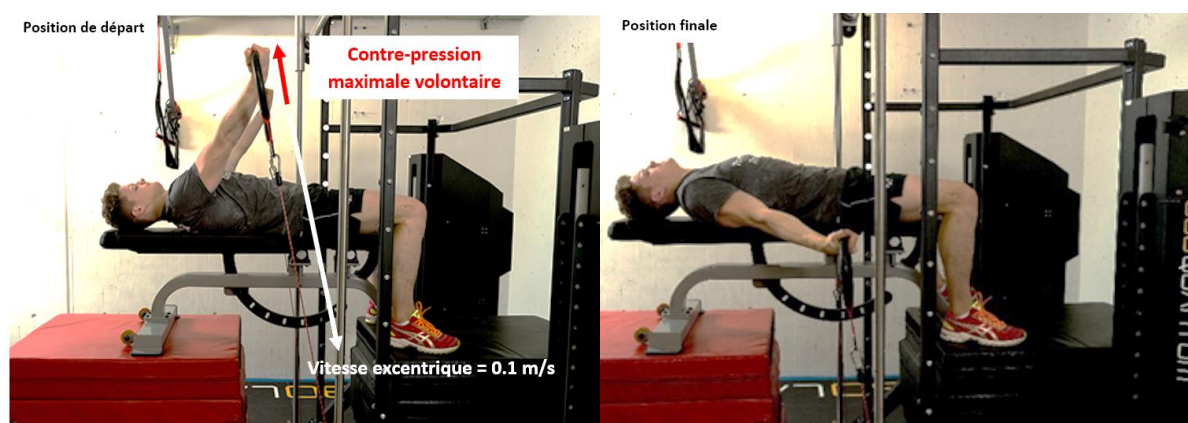


Figure 2. Mouvement en force excentrique effectué avec l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro. Position de départ avec les bras tendus en antéversion (70°) sur l'image de gauche : Contre pression volontaire sur les anneaux. Position finale sur l'image de droite : Bras tendus en rétroversion (15°).

2.3 Instrument, procédés de mesure, évaluation et analyse statistique

2.3.1 Quantum Syncro. Le Quantum Syncro (1080 Motion, Lidingö, Suède) est constitué de deux machines de traction avec des câbles synchronisés et commandés par ordinateur. Au cours de l'entraînement excentrique isocinétique, la vitesse de déplacement a été fixée à 0.1 m/s. Les paramètres de force maximale excentrique isocinétique ont été enregistrés à une fréquence de 333 Hz. Les valeurs de force maximale excentrique isocinétique (N) de toutes les répétitions ont été obtenues à l'aide du logiciel fourni. Puis les données brutes ont été exportées vers Microsoft Office Excel 2013 pour Pc (Microsoft Corporation, Redmond, Wa, USA).

2.3.2 Evaluation statistique. La force maximale représente le pic le plus élevé de force (N) par répétition. A partir de cette valeur maximale, le 80% et le 50% de celle-ci ont été calculés. Le temps sous tension (TpsT) > 50% et > 80% de la force maximale correspond à la durée où le gymnaste a appuyé plus de 50% mais moins de 80% de sa Fmax (N) à chaque répétition. La force moyenne (Fmoy) représente quant à elle, la moyenne de la force (N) déployée durant toute la durée du mouvement (figure 3).

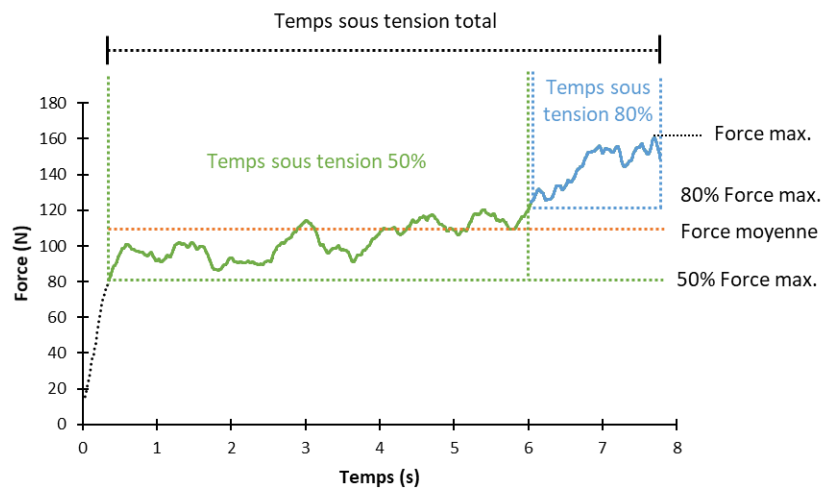


Figure 3. Exemple d'une courbe de force d'une répétition de l'exercice excentrique isocinétique et visualisation du calcul des paramètres utilisés dans cette étude (→ le temps sous tension total correspond à la force (N) développée par rapport à la durée (Temps) du mouvement en secondes (s). Il représente l'addition du temps sous tension à > 50% et > 80% de la Fmax).

2.3.3 Analyse statistique. Les valeurs de Fmax et de Fmoy par répétition en résistance excéntrique isocinétique de tous les athlètes ont été utilisées pour calculer la moyenne et les écarts-types par entraînement, série et bloc au moyen du logiciel de traitement statistique SPSS 22 (SPSS, Inc., Chicago, IL). Le test de Wilcoxon a été appliqué pour vérifier les différences de valeurs maximales (Fmax) des entraînements 2 à 8 (T2-T8) par rapport à l'entraînement 1 (T1) mais aussi pour examiner les différences entre les entraînements consécutifs (T1-T8) et également entre les séries du même entraînement (T1_S1 – T8_S3) afin d'analyser la qualité des répétitions par entraînement et par série. Pour la Fmoy, seuls les deux entraînements de la même semaine ont été comparés. Concernant les valeurs du TpsT (total, >50% et > 80%), elles ont été présentées graphiquement.

3 Résultats

Les neuf athlètes ont participé de manière totale à tous les entraînements durant la globalité de l'étude. Aucun gymnaste ne s'est blessé durant la prise de mesure.

3.1 La Force maximale (Fmax)

La Fmax a augmentée significativement de 8% entre T1 et T4 ($p=0.04$) mais aussi entre T1 et T5 de 14 % ($p=0.02$). La figure 4 montre que les autres valeurs n'ont pas changées statistiquement dans ce cas, mais la Fmax était plus élevée de 1 à 14% à chaque entraînement (T2-T8) par rapport à l'entraînement 1 (T1). Le pic le plus élevé correspondait à l'entraînement 5 (T5) et le plus bas était lors du premier entraînement (T1). Entre les entraînements T1-T2 ; T3-T4 ; T4-T5 ; T7-T8, une tendance non-significative de 2 à 7% de la Fmax s'est produite par contre une diminution de 1 à 4 % a été démontrée entre les entraînements T2-T3 ; T5-T6 ; T6-T7. Concernant les séries, il n'y a pas eu de changement significatif de la Fmax lors des entraînements composés de 2 séries mais seulement pendant les entraînements au cours desquels les gymnastes devaient effectuer 3 séries à chacun. Elle a baissé de 9% entre T3_S1 et T3_S3, de 7% entre T3_S2 et T3_S3, de 6% entre T4_S1 et T4_S2, de 9% entre T4_S2 et T4_S3 et de 5% entre T8_S2 et T8_S3. Par contre, lors de chaque série, la Fmax eu une tendance positive par rapport à la première de l'entraînement 1 (T1_S1) sauf pour la série 3 du troisième entraînement (T3_S3) qui a obtenu le pic le plus bas. Au contraire, le pic le plus haut était lors de la série 2 de l'entraînement huit (T8_S2).

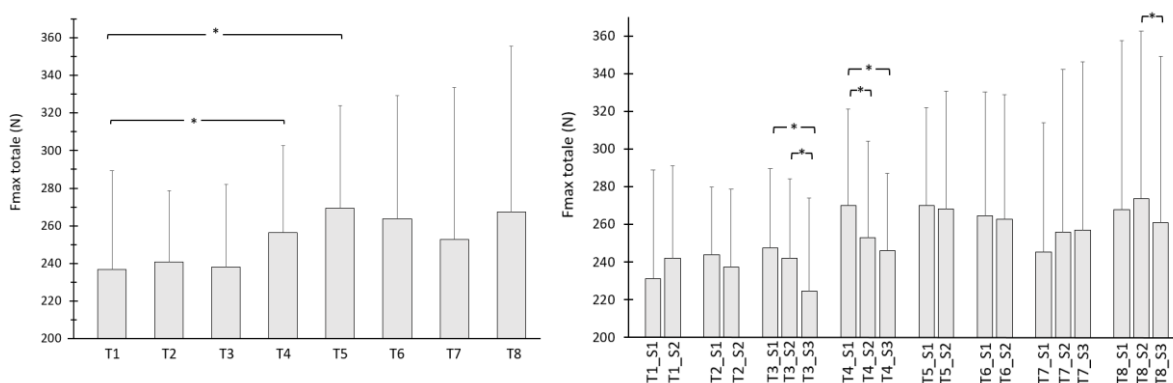


Figure 4. Moyenne et \pm écart-type standard de la force maximale par entraînement (T1-T8) et par série (T1_S1-T8_S3). Les Valeurs maximales de la force excentrique en newton (N) par entraînement et par série (Fmax) de tous les athlètes regroupés ($n=9$) sur les quatre semaines. *changement significative = $p<0.05$.

3.2 La Force moyenne (Fmoy)

La Fmoy n'a obtenu qu'un seul changement significatif lors de la comparaison d'entraînement ayant la même charge. Il y a eu donc une augmentation significative de 7% ($p=0.01$) entre l'entraînement 7 (T7) et 8 (T8). Pour les 3 autres semaines, la Fmoy a diminuée entre le 1^{er} et le second entraînement. La Fmoy a aussi diminuée à chaque entraînement par rapport au premier sauf pour les entraînements 5 (T5) et 6 (T6) où elle a augmentée. La moyenne la plus élevée de Fmoy développée durant le mouvement s'est produite lors de l'entraînement 5 (T5) et la plus basse pendant le septième entraînement (T7). Concernant, la Fmoy par série, il n'y a eu qu'une diminution significative lors des entraînements avec 2 séries (T2_S1 – T2_S2). Par contre, pendant les entraînements composés de 3 séries, une diminution significative entre 6 et 20% est toujours apparues. La Fmoy a également eu une tendance négative après chaque première série lors du même entraînement. La plus haute se situait lors de la série 1 de l'entraînement 5 (T5_S1) et la plus basse lors de la troisième série de l'entraînement sept (T7_S3) (figure 5).

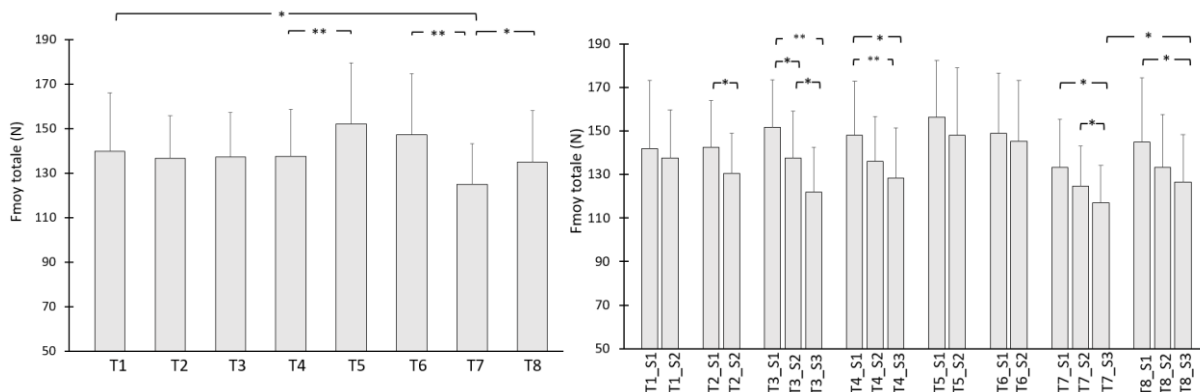


Figure 5. Moyenne et \pm écart-type standard de la force moyenne par entraînement (T1-T8) et par série (T1_S1-T8_S3). Les Valeurs moyennes de la force excentrique en newton (N) par entraînement et par série (Fmoy) de tous les athlètes regroupés ($n=9$) sur les quatre semaines. *changement significative = $p<0.05$, **changement significative = $p<0.01$.

3.3 Le Temps sous tension (TpsT)

Les gymnastes ont effectué sur les quatre semaines d'entraînement un TpsT total ($> 50\% + > 80\%$) de 28 min et 25 s. Respectivement, la semaine 1 (T1-T2) a connu une durée totale de 7 min et 12 s, la semaine 2 (T3-T4) de 7 min et 51 s, la troisième (T5-T6) de 5 min et 3 s et la quatrième (T7-T8) de 9 min et 37 s. Les gymnastes ont effectué un TpsT total ($> 50\% + > 80\%$) par entraînement entre 3 min et 39 s (T1) à 4 min et 49 s (T8), Ce qui représente une augmentation de 24 %. Toutes les semaines ont connu une diminution du TpsT total ($> 50\% + > 80\%$) entre le 1^{er} entraînement et le deuxième. La semaine 1 entre T1-T2 s'est produit une régression de 2%, pour la semaine 2 entre T3-T4, il y a eu une diminution de 11%, quant à la troisième entre T5-T6, elle a obtenu une baisse de 3% et pour finir la dernière semaine d'entraînement a montré une régression de seulement 0.14%. Le TpsT total ($> 50\% + > 80\%$) a diminué également après chaque série de 3 à 14% de chaque entraînement. La série représentant le temps sous tension total le plus haut était la série 1 de l'entraînement 1 (T1_S1) se situant à 1 min et 47 s et le plus bas à 1 min et 4 s (T4_S3). Concernant le TpsT à $>50\%$ et à $> 80\%$ de la force maximale, pour tous les deux, il y a eu une diminution après chaque série. La durée la plus élevée d'une série à $> 50\%$ de la Fmax était de 1 min et 22 s (T1_S1) et la plus basse (55 s) s'est déroulée pendant la série 3 du quatrième entraînement (T4_S3). Pour le TpsT à $> 80\%$ de la Fmax, la série la plus longue était de 24 s lors de l'entraînement 1 (T1_S1) et la plus basse (9 s) lors de la série 3 du quatrième entraînement (T4_S3) (figure 6).

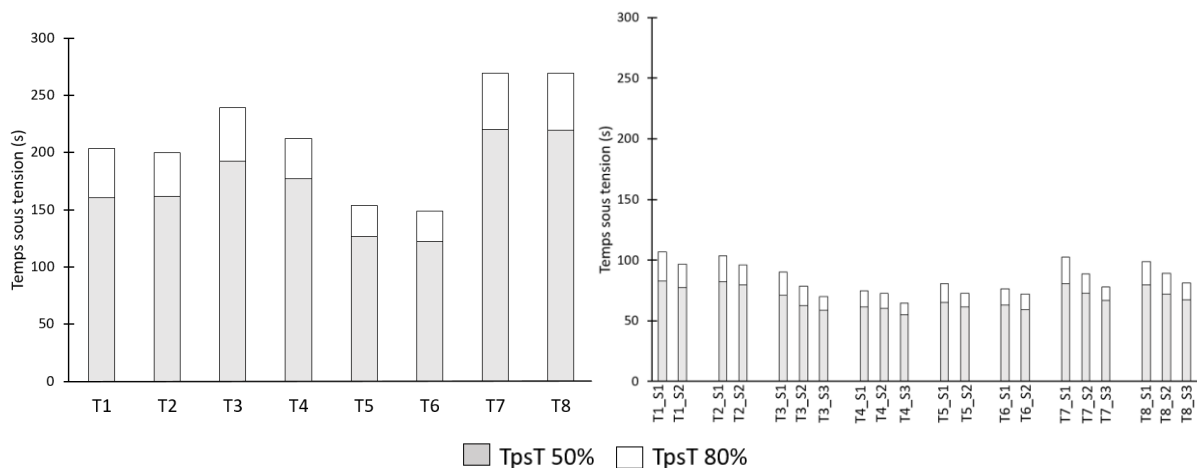


Figure 6. Temps sous tension en secondes (s) additionnant la somme totale de tous les athlètes (n = 9) à $> 50\%$ (TpsT 50%) et $> 80\%$ de la force maximale (TpsT 80%) pour chaque entraînement (T1-T8) et chaque série (T1_S1- T8_S3) sur les quatre semaines.

4 Discussion

Les deux objectifs de ce travail étaient d'évaluer l'effet immédiat et à court terme d'un programme d'entraînement de force maximale spécifique (excentrique isocinétique) sur quatre semaines avec l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro sur le développement de la force excentrique isocinétique (force maximale (F_{max}) et endurance en force maximale (F_{moy})) mais aussi la qualité des répétitions (temps sous tension (T_{psT})) afin d'optimiser le programme d'entraînement pour les futures interventions.

4.1 La force maximale (F_{max})

L'effet d'un programme d'entraînement avec la méthode de « Cluster » sur la force excentrique isocinétique est déjà visible après 5 séances d'entraînement. Les résultats ont montré que la force maximale par entraînement s'est améliorée (presque) continuellement jusqu'à l'entraînement 5 (T5) et a obtenu des différences significatives lors des entraînements 4 (T4) et 5 (T5) par rapport au premier (T1). La plus forte augmentation de F_{max} par entraînement a été de 12% (T5) en comparaison à T1. Après ce pic, elle a diminué entre l'entraînement 6 (T6) et 7 (T7) mais a à nouveau augmentée (de manière non-significative) lors de l'entraînement 8 (T8). Ceci montre que les gymnastes étaient probablement fatigués après 5 séances d'entraînement et qu'ils ont récupérés au 8^{ème} entraînement ou étaient plus motivés en sachant que c'était la dernière session. Un programme en force excentrique isocinétique apporte très rapidement des gains de force (Farthing & Chilibeck, 2003) comparé à un entraînement en mode isoinertiel qui met beaucoup plus de temps (Smith & Rutherford, 1995). En termes d'optimisation de programme, les prochaines interventions devraient être composées de moins d'entraînement.

Un autre résultat très important était l'augmentation de la F_{max} (non-significative) après chaque entraînement difficile (de T3 à T4 ; T4 à T5 et T7 à T8) indiquant que les gymnastes ont eu besoin d'un certain nombre élevé de répétition au total ou par entraînement pour développer la F_{max} . Par contre, il était tout autant nécessaire d'avoir des entraînements plus faciles pour varier la charge et stimuler les muscles. Selon Hodges et al. (2005), ajouter et varier les intensités permet un gain de force plus rapide que si l'athlète se familiarise avec la charge demandée. Ceci est donc particulièrement profitable pour les athlètes d'élite qui ont une charge d'entraînement quotidienne plus élevée qu'une personne débutante.

Concernant les séries, la F_{max} a obtenu une variation positive à chaque série par rapport à la première de l'entraînement 1 (T1_S1) (sauf pour la série 3 du troisième entraînement (T3_S3) qui était la valeur de F_{max} la plus basse). Ces changements positifs de F_{max} après chaque

entraînement attestent un temps de récupération adéquat et une amélioration bénéfique de la force maximale de la musculature du haut corps grâce à l'entraînement excentrique isocinétique. Selon Weineck (1999), il est possible sur une semaine d'effectuer 2 entraînements identiques en terme de charge, car le temps de récupération est de seulement 2 à 3 jours. Des diminutions significatives de la F_{max} se sont produites entre les séries lors de la deuxième semaine où les gymnastes devaient effectuer 3 séries par entraînement. Ces résultats confirment que malgré la charge élevée, le programme a été réfléchi pour que la F_{max} puisse être obtenue. Un des objectifs du programme était de garder une certaine qualité pendant les répétitions lors des blocs (sous forme de force maximale). En ce sens, il a été intéressant d'incorporer au programme des entraînements composés de trois séries car ce n'est qu'après le premier entraînement (T3 à T4) que la F_{max} a augmentée (T5). L'utilisation de la méthode de « Cluster » peut donc être un bon moyen pour varier cette charge. Les travaux de Sahlin et Ren (1989) confirment qu'avec cette méthode, la capacité maximale de production de force par rapport aux dispositions initiales augmente.

4.2 La force moyenne (F_{moy})

Pour la force moyenne, les résultats ont montré une diminution à chaque entraînement par rapport au premier jusqu'aux entraînements 5 (T5) et 6 (T6) où elle a augmentée. Ceci confirme que l'utilisation de 3 séries par entraînement (T3 à T4) implique une charge très élevée qui est difficile à supporter pour les athlètes mais probablement nécessaire pour varier la charge. Cependant, après l'entraînement 6 (T6), elle a à nouveau diminuée, provoquant encore une fois une fatigue. Le programme d'entraînement a été vraisemblablement un peu trop long (ev. 4 à 5 séances suffisent à augmenter la F_{moy} avec cette méthode). Mais il est indispensable que les gymnastes se fatiguent pendant l'entraînement afin qu'un stimulus se produise (effet d'endurance) et donc les semaines avec un nombre conséquent de répétitions sont importantes pour qu'il ait une amélioration de la F_{moy} . Selon Kraemer et Fleck (1988), il faut que la force demandée soit physiologique plus intense que les capacités de bases de l'organisme pour développer la force. Le taux de F_{moy} n'a quasiment pas changé entre la semaine 1 (T1 et T2) et la semaine 2 (T3 et T4), ceci même si pendant la seconde, la charge était plus élevée dû aux 3 séries par entraînement. Il est intéressant de voir une augmentation significative de 7% lors de la quatrième semaine entre l'entraînement 7 (T7) et l'entraînement 8 (T8). Cette différence peut être démontrée par le fait que même si la pratique de trois séries est difficile, le temps de pause entre les entraînements est suffisant et a permis aux gymnastes de récupérer pour augmenter la F_{moy} lors du second entraînement hebdomadaire ou plutôt par un pic de motivation des athlètes

en sachant que c'était le dernier entraînement. Les différences significatives entre les entraînements 4 (T4) et 5 (T5) et les entraînements 6 (T6) et 7 (T7) montrent que le nombre de répétitions et de séries jouent un rôle fondamental sur la Fmoy. Respectivement, l'entraînement 4 était composé de 36 répétitions sur trois séries, l'entraînement cinq et six (T5, T6) de 24 répétitions sur deux séries et le septième de 48 répétitions sur trois séries. C'est pour cela, qu'il est très important de quantifier et surveiller la charge d'entraînement afin de l'adapter aux besoins et objectifs de l'athlète pour accroître ses performances sans se blesser (Platonov, 1988). Concernant, la force moyenne par série, c'est étonnant de voir qu'elle a diminuée surtout après chaque série de 6 à 20% lors des entraînements avec trois séries et que seule une diminution significative a été prouvée pour les entraînements à deux séries. Si on regarde la longueur (nombre de blocs) des séries des deux premiers entraînements (T1 et T2), elles étaient plus longues (4 blocs/ série) que celles des séries des entraînements T3 et T4 (3 blocs/ série) mais lors de celles-ci, il y avait déjà des diminutions significatives à la 2^{ème} série. Ceci montre que la longueur (nombre de blocs) n'a pas forcément un impact sur la gestion des entraînements mais plutôt le nombre de séries. Dans la deuxième série de T3 et T4, les athlètes ont surement économisé leur force (énergie) en sachant qu'il y avait encore une 3^{ème} à faire. Par contre, la récupération entre les entraînements est totale vu que les gymnastes obtiennent la force moyenne la plus élevée au début de chaque l'entraînement.

4.3 Le temps sous tension (TpsT)

Il est important de rappeler qu'il y avait deux entraînements identiques avec le même nombre de répétitions et de séries par semaine. Les gymnastes ont effectué un temps sous tension total qui variait de 3 min 39 s (T1) à 4 min 49 s (T8). Ce qui représente une variation de 24 %. Les résultats du TpsT ressemblent en général à ce qui avait été prévu dans le programme. La dernière semaine les gymnastes ont effectué le maximum de répétitions (96 rép), l'avant dernière (48 rép), la deuxième semaine (72 rép) et la première (64 rép). La variation des répétitions a donc conduit à la variation du TpsT au cours des semaines d'entraînement. Le TpsT total était plus au moins égal à chaque semaine entre le 1^{er} entraînement et le second sauf pour l'entraînement 4 (T4) où le TpsT total était nettement inférieur à celui obtenu lors du 3^{ème} entraînement (T3) et presque identique à T1 et T2 (où les gymnastes ont fait 4 rép de moins par entraînement). Cela signifie que l'intensité et l'effort demandé n'ont pas pu être atteints surtout si on voit que la Fmoy n'est pas supérieure à celle des entraînements précédant. Toutes les semaines ont quand même connu un TpsT total qui a régressé entre le 1^{er} entraînement et le deuxième. Les athlètes ont probablement raccourci intuitivement les répétitions avec la fatigue. La fatigue joue donc

un rôle important sur la durée du temps sous tension lors d'exercices excentriques isocinétiques. Dans ce cas, la diminution du TpsT est une action volontaire de la part des gymnastes qui ont commencé à appuyer plus tard contre les anneaux à chaque répétition. Il y a quand même une différence entre les semaines 1 (T1 et T2) et 3 (T5-T6) composées de seulement 2 séries et les semaines 2 (T3-T4) et 4 (T7-T8) constituées de 3 séries. Sur les quatre semaines, lors des entraînements avec 3 séries le temps sous tension total était plus élevé que ceux avec 2 séries mais les semaines avec 3 séries ont obtenues une plus grande diminution du TpsT total entre les deux entraînements que lors des entraînements avec 2 séries. Ces résultats confirment que le nombre de répétitions par entraînement a un impact sur le TpsT total. La chute de 11% entre l'entraînement 3 et 4 montre que la charge était très dure et que les gymnastes n'ont pas réussi à maintenir un temps sous tension élevée mais la Fmax a tout de même augmentée. A rappeler que lors d'un entraînement excentrique intense ou inhabituel, des douleurs retardées peuvent survenir (courbatures) dans les 12 à 48 h après la séance et connaissent un pic plus élevé entre 24 et 72 heures (Ebbeling & Clarkson, 1989). Ces douleurs sont donc accompagnées d'une diminution de la capacité de force (Murayama, Nosaka, Yoneda & Minamitani, 2000). Par contre les résultats de la semaine 4 (-0.14% entre T7 et T8) ont montré que les athlètes se sont habitués à ce type d'effort. Ceci pourrait être expliqué par la réduction de l'impact des douleurs retardées sur l'organisme après chaque entraînement si le temps de récupération est respecté (McHugh, Connolly, Eston, Gartman & Gleim, 2001). Ce processus entraine une meilleure répartition du stress mécanique sur l'ensemble des fibres musculaires actives et donc une meilleure adaptation (Nosaka & Clarkson, 1995). Selon Liber et Friden (2002), ce serait valable que pour des entraînements identiques ayant la même charge. Par contre, cette explication sur l'adaptation de l'organisme face aux courbatures n'a pas été mesurée dans ce travail. Concernant le TpsT à > 50% et à > 80% de la Fmax, il y a eu une diminution après chaque série à chaque entraînement. Les athlètes ont démontré le temps sous tension le plus élevé à > 50% (1 min 22 s), à > 80% (24 s) de la Fmax lors de la série 1 du premier entraînement (T1_S1). Cela est probablement dû au fait que c'était la toute première série et que les gymnastes étaient encore en forme physique optimale.

Cette étude permet de dire que la qualité du mouvement et la fatigue des gymnastes sont différentes entre chaque entraînement mais également en fonction du nombre de séries demandé. Le temps de pause entre les entraînements était complet vu que lors des premières séries le TpsT était le plus élevé. Par contre entre les séries, la pause était très courte pour récupérer totalement provoquant une surcharge et une fatigue élevée chez les athlètes.

De manière générale, la méthode de « Cluster » en contraction excentrique isocinétique montre que les entraînements avec 3 séries ont un effet épuisant. Lorsque ceux-ci étaient composés de seulement 2 séries, le niveau de force maximale ainsi que la force moyenne peuvent être maintenus jusqu'à la fin. De plus, on peut constater qu'après T3 et T4 (entraînement avec une charge importante), une augmentation significative de la Fmax a pu être observée. Cela donne à penser que la fatigue a conduit à un stimulus et ensuite à une adaptation. Par conséquent, un entraînement avec une charge élevée est important dans ce contexte afin d'améliorer la force maximale. Cependant, il semble qu'après l'augmentation de la force maximale dans le T5, une fatigue générale s'est produite. Ainsi, la durée du programme (nombre de semaines et d'entraînements) est à reconsidérer. La force moyenne quant à elle ne change pas vraiment entre les différents entraînements sauf de l'entraînement 7 à 8 et par conséquent, l'impact de la longueur des séries et du nombre de répétitions par entraînement sur la force moyenne appliquée n'est pas vraiment pertinent. Le temps sous tension montre qu'avec la fatigue croissante, les répétitions sont devenues plus courtes (2^{ème} entraînement par semaine, lors des séries 2 et 3). Les athlètes n'ont pas fait la même longueur ni la même intensité à chaque entraînement. Il serait donc intéressant dans des études ultérieures de normaliser la durée de stimulation (c.-à-d. le TpsT) afin que le stimulus d'entraînement en force soit encore plus contrôlable.

Selon Wilk et al. (2009), pour une bonne évaluation isocinétique excentrique, il faut un protocole rigoureux en utilisant toujours les mêmes angles articulaires. Dans ce travail, l'angle de départ et d'arrivée du mouvement a été défini manuellement à chaque répétition pour chaque athlète. La force maximale, la force moyenne et le temps sous tension peuvent donc varier. Il aurait fallu être très précis avec tous les sujets car le lien entre la longueur et la tension du muscle dépendra du mouvement articulaire. Il serait également intéressant pour être plus précis dans la recherche de qualité par rapport aux entraînements d'avoir d'avantages de références au niveau subjectif. Par exemple, l'utilisation du modèle de Foster (Foster, 1998) afin de quantifier la charge à partir de l'échelle de Borg modifiée par Foster et al. (2001). Cette échelle permettrait de connaître la sensation subjective de l'athlète après chaque répétition, bloc, série et entraînement et de connaître si une fatigue psychologique vient s'ajouter à la fatigue musculaire. Ce qui aiderait à faire un lien avec la charge objective. Pour finir, à ne pas oublier que l'utilisation de l'appareil d'entraînement 1080 Quantum Syncro en contraction isocinétique excentrique en gymnastique artistique masculine et plus spécifiquement en lien avec les anneaux est une grande première. C'est un outil très intéressant qui ne demande qu'à être développé. Pour ce faire, des recherches supplémentaires dans ce domaine sont nécessaires afin valider totalement les mesures enregistrées.

Pour terminer, reprenons les questions initiales. L'entraînement excentrique isocinétique spécifique selon la méthode de « Cluster » pendant quatre semaines a fait développer la force maximale des membres supérieurs (presque) continuellement jusqu'à l'entraînement 5 mais pas jusqu'au dernier et a obtenu des différences significatives seulement lors des entraînements 4 et 5 par rapport au premier. La force moyenne n'a pas du tout augmentée significativement entre l'entraînement 1 et 8 mais est restée plutôt constante. De manière générale, la F_{max} et la F_{moy} ont significativement diminuées après chaque série du même entraînement lors que ceux-ci étaient composés de 3 séries. C'est lors de ces entraînements avec une charge difficile que la fatigue s'est fait le plus ressentir mais qu'après ceux-ci, une augmentation de la F_{max} et de la F_{moy} a été démontrée. L'hypothèse H1 est donc partiellement confirmée.

Concernant le temps sous tension total (>50% et >80% de la F_{max}) des membres supérieurs, il a bel et bien varié chaque semaine en fonction de la charge d'entraînement (nombre de répétitions, blocs et séries). Les répétitions sont devenues plus courtes dû à une fatigue croissante lors du second entraînement pendant les séries 2 et 3 à chaque semaine de 3 à 14%. Les athlètes n'ont donc pas fait la même longueur ni la même intensité à chaque entraînement. L'hypothèse H2 peut être confirmée.

5 Conclusion

Le programme d'entraînement excentrique isocinétique avec l'appareil 1080 Quantum Syncro a entraîné une augmentation de la force maximale. Le suivi de la charge (par répétition, bloc et série) à chaque entraînement sur les 4 semaines a montré une augmentation de la F_{max} seulement jusqu'à la 5^{ème} session. Il faudrait donc adapter la durée du programme (nombre de semaines et d'entraînements) pour de nouvelles interventions. La méthode de « Cluster » montre que les entraînements avec 3 séries ont un effet épuisant. Lorsque ceux-ci étaient composés de seulement 2 séries, le niveau de force maximal ainsi que la force moyenne peuvent être maintenus jusqu'à la fin. De plus, on peut constater qu'après les entraînements avec une charge importante, une augmentation significative de la force maximale a pu être observée. Cela donne à penser que la fatigue a conduit à un stimulus et ensuite à une adaptation. Par conséquent, un entraînement avec une charge élevée est important dans ce contexte (entraînement excentrique isocinétique) afin d'améliorer la force maximale.

En ce qui concerne le temps sous tension, il variait chaque semaine en fonction de la charge d'entraînement (nombre de répétitions, blocs et séries). La qualité du mouvement exercé et la fatigue des gymnastes étaient donc différentes entre chaque entraînement. Une meilleure standardisation du mouvement devrait être mise en place afin que toutes les répétitions aient la même longueur. Ce n'est que comme ça, que l'on peut vraiment prévoir à quelle charge sont soumis les athlètes et donc mieux planifier la charge.

Finalement, l'entraînement de force excentrique isocinétique de cette étude est fortement recommandé en gymnastique artistique pour développer les capacités de freinage du système musculo-tendineux des membres du haut du corps afin d'intégrer d'avantage d'éléments de force dans l'exercice de compétition. Par contre, il est important de bien planifier la durée du programme et quantifier la charge afin d'éviter tout risque de blessure.

Bibliographie

- Armstrong, R. B., Ogilvie, R. W. & Schwane, J. A. (1983). Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 54(1), 80-93. [doi:10.1152/jappl.1983.54.1.80](https://doi.org/10.1152/jappl.1983.54.1.80)
- Bango, B., Sillero-Quintana, M. & Grande, I. (2013). New Tool to assess the Force Production in the Swallow. *Science of Gymnastics Journal*, 5(3), 47-58.
- Bango, B., Navandar, A., Grande, I. & Sillero-Quintana, M. (2017). Evaluation of isometric force production in L-sit cross in still rings among elite male artistic gymnasts. *Journal of Human Sport & Exercise*, 12(2), 257-266. [doi:10.14198/jhse.2017.122.02](https://doi.org/10.14198/jhse.2017.122.02)
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5), 377-381.
- Brandenburg, J. P. & Docherty, D. (2002). The effects of accentuated eccentric loading on strength, muscle hypertrophy, and neural adaptations in trained individuals. *J Strength Cond Res*, 16(1), 25-32.
- Brechue, W. F. & Mayhew, J. L. (2009). Upper-body work capacity and 1RM prediction are unaltered by increasing muscular strength in college football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(9), 2477-2486. [doi:10.1519/JSC.0b013e3181b1ae5f](https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b1ae5f)
- Campos, M. J. A. (2009). The importance of the swallow on structuring and valuing rings exercises of mens artistic gymnastics. *Palestrica Mileniului III – Civilizatie si Sport*, 10(2), 190-195.
- Chabloz, E. (2016). *Les bases de la planification en musculation*. (Travail de Master, Université de Lausanne, Suisse). Accès à l'adresse <https://www.chuv.ch/fileadmin/sites/cms/documents/planificationmusculationfinal.pdf>
- Chan, K. M., Maffulli, N., Korkia, P. & Li, R. C. T. (1996). *Principles and Practice of Isokinetics in Sports Medicine and Rehabilitation*. Hong Kong: Williams & Wilkins.
- Codine, P., Hérisson, C. & Denat, B. (2001). *Isocinétisme et rachis*. Paris : Masson.
- Codine, P., Bernard, P. L., Pocholle, M. & Hérisson, C. (2005). Evaluation et rééducation des muscles de l'épaule en isocinétisme : méthodologie, résultats et applications. *Annales de Réadaptation et Médecine Physique*, 48, 80-92.
- Coudreuse, J. M., Dupont, P. & Nicol, C. (2007). Douleurs musculaires post-effort. *Journal de traumatologie du sport*, 103-110.

- Cowell, J. F., Cronin, J. & Brughelli, M. (2012). Eccentric Muscle Actions and How the Strength and Conditioning Specialist Might Use Them for a Variety of Purposes *Strength & Conditioning Journal*, 34(3), 33-48. [doi:10.1519/SSC.0b013e318253f578](https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318253f578)
- Croisier, J. L. (1998). Analyse critique des valeurs chiffrées. Dans A. Croisier, J. L., *Isocinétisme et médecine sportive* (48-56). Paris : Masson.
- Croisier, J. L., Maquet, D., Crielaard, J. M. & Forthomme, B. (2009) Quelles applications du travail excentrique en rééducation? *Kinésithère Rev*, 85-86, 56-57.
- Davies, G. A. (1992). *Compendium of Isokinetics in Clinical Usage and Rehabilitation Techniques* (4th Edition). Wisconsin, USA: S & S Publishers.
- Dunlavy, J. K., Sands, W. A., McNeal, J. A., Stone, M. H., Smith, S. L., Jemni, M. & Haff, G. G. (2007). Strength performance assessment in a simulated mens gymnastics still rings cross. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6, 93-97.
- Ebbeling, C. B. & Clarkson, P. M. (1989). Exercise-induced muscle damage and adaptation. *Sports Med*, 7, 207-234.
- Edouard, P. (2011). *Adaptations de la force musculaire des muscles rotateurs médiaux et latéraux dans la stabilisation dynamique de l'articulation scapulo-humérale. Applications à des situations pathologiques et sportives* (Thèse, Université de Jean Monnet, Saint-Etienne, France). Accès à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718892/document>
- Eloranta, V. & Komi, P. V. (1980). Function of the quadriceps femoris muscle under maximal concentric and eccentric contraction. *Electromyogr. Clin. Neurophysiol*, 20, 159 -174.
- Farthing, J. P & Chilibeck, P. D. (2003). The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur J Appl Physiol*, 89(6), 578-86.
- FIG. (2017). *Code of Points MAG (2017-2020)*. Lausanne: FIG.
- Fleck, S. J & Kraemer, W. J. (1997). *Designing Resistance Training Programs* (2nd Edition) (117-130). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Forthomme, B. (2005). *Exploration musculaire isocinétique de l'épaule* (Mémoire, Université de Liège, Liège, Belgique). Accès à l'adresse <http://hdl.handle.net/2268/78190>
- Fossier, E. (1991). Méthodes d'évaluation isocinétique : principes. Dans A. Heuleu, J. N., P. Codine, P., & Simon, L. *Isocinétisme et médecine de rééducation* (10-16). Paris: Masson.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(7), 1164-1168.

- Foster, C., Florhaug, J.A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L.A., Parker, S., Doleshal, P.,...Dodge, C. (2001). A new Approach to Monitoring Exercise Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109-115.
- Frey, G. (1977). Zur Terminologie und Struktur physischer Leistungsfaktoren und motorischer Fähigkeiten. *Leistungssport*, 7, 339-362.
- Fyfe, I. & Stanish, W. D. (1992). The use of eccentric training and steching in the treatment ant prevention of tendon injuries. *Clinics in sports Medecine*, 11, 601-624.
- Gorosito, M. A. (2013). Relative strength requirement for swallow element proper execution a predictive test. *Science of Gymnastics Journal*, 5(3), 59-67.
- Giorgi, A., Wilson, G. J., Weatherby, R. P. & Murphy, A. J. (1998). Functional isometric weight training: its effects on the development of muscular function and the endocrine system over an 8-week training period. *J. Strength Cond. Res.* 12, 18-25.
- Guilhem, G., Cornu, C., & Guével, A. (2010). Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 53(5), 319-341. [doi:10.1016/j.rehab.2010.04.003](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2010.04.003)
- Haff, G. G., Whitley, A., McCoy, L. B., O'Bryant, H. S., Kilgore, J .L., Haff, E. E.,...Stone, M. H. (2003). Effects of different set configurations on barbell velocity and displacement during a clean pull. *J Strength Cond Res* 17, 95-103.
- Häkkinen, K., Komi, P. V., Alen, M. & Kauhanen, H. (1987). EMG, muscle fiber and force production characteristics during a 1 year training period in elite weightlifters. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, 419-427.
- Hather, B. M., Tesch, P. A., Buchanan, P. & Dudley, G.A. (1991). Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta Physiol. Scand.* 143, 177-185.
- Hedayatpour, N. & Falla, D. (2015). Physiological and Neural Adaptations to Eccentric Exercise: Mechanisms and Considerations for Training. *Biomed Res Int*, 193741. [doi:10.1155/2015/193741](https://doi.org/10.1155/2015/193741)
- Higino, W. P., Aparecido de Souza, R., Cavalcanti Fde, S., Cardoso Ados, S., Vasconcelos, M. V., Fernandes da Silva, F. & Leme, J. A. (2016). Influence of repeated bouts of eccentric exercise on high-intensity aerobic performance. *J Phys Ther Sci*, 28(8), 2369-2372. [doi:10.1589/jpts.28.2369](https://doi.org/10.1589/jpts.28.2369)
- Hislop, H. J. & Perrine, J. J. (1967). The isokinetic concept of exercise. *Phys Ther*, 47, 114-117.

- Hodges, N. J., Hayes, S., Horn, R. R. & Williams, A.M. (2005). Changes in coordination, control and outcome as a result of extended practice on a novel motor skill. *Ergonomics* 48, 1672–1685.
- Hübner, K. & Schärer, C. (2015). Relationship between swallow, support scale and iron cross on rings and their specific preconditioning strengthening exercises. *Science of Gymnastics Journal*, 7(3), 59-68.
- Isner-Horobeti, M., Dufour, S. P., Vautravers, P., Geny, B., Coudeyre, E. & Richard, R. (2013). Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med*, 43,483–512. [doi:10.1007/s40279-013-0052-y](https://doi.org/10.1007/s40279-013-0052-y)
- Jemni, M., Friemel, F., Le Chevalier, J. M. & Origas, M. (1998). Bioénergétique de la gymnastique de haut niveau. *Education Physique et Sportive*, 39, 29-34.
- Kellis, E. & Baltzopoulos, V. (1995). Isokinetic eccentric exercise. *Sports Med*, 19(3), 202-22.
- Komi, P. V., Kaneko, M. & Aura, O. (1987). EMG activity of leg extensor muscles with special reference to mechanical efficiency in concentric and eccentric exercise. *Int. J. Sports Med*. 8, 22–29.
- Kovaleski, J. E., Heitman, R. H., Trundle, T. L. & Gilley, W. F. (1995). Isotonic preload versus isokinetic knee extension resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 27(6), 895-899.
- Kraemer, W. J., Fleck, S. J. & Evans, W. J. (1996). Strength and power training: Physiological mechanisms of adaptation. *Exerc Sport Sci Rev* 24, 363–397.
- Kraemer, W. J. & Fleck, S. J. (1988). Resistance training: exercise prescription (part 4 of 4). *Phys. Sports Med*, 16, 69 – 8.
- Lawton, T., Cronin, J., Drinkwater, E., Lindsell, R. & Pyne, D. (2004). The effect of continuous repetition training and intra-set rest training on bench press strength and power. *J Sports Med Phys Fitness* 44, 361–367.
- Lieber, R. L. & Friden, J. (2002). Morphologic and mechanical basis of delayed-onset muscle soreness. *J Am Acad Orthop Surg*, 10(1), 67-73.
- Linari, M., Lucii, L., Reconditi, M., Vannicelli Casoni, M. E., Amenitsch, H., Bernstroff, S.,...Lombardi, V. (2000). A combined mechanical and X-ray diffraction study of stretch potentiation in single frog muscle fibres. *J Physiol*, 526(3), 589–96. [doi:10.1111/j.1469-7793.2000.00589.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.00589.x)
- Maier, T., Gross, M., Trösch, S., Steiner, T., Müller, B., Bourban, P., ... Tschopp, M. (2016). *Manual Leistungsdiagnostik*. Bern : Swiss Olympic Association.

- Marconnet, P. & Komi, P. (1988). Structure, architecture et fonctions des muscles striés squelettiques. Dans A. Heuleu, J. N. & Simon, L. *Muscle et rééducation* (1-25). Paris : Masson.
- McHugh, M. P., Connolly, D. A., Eston, R. G., Gartman, E. J. & Gleim, G.W. (2001). Electromyographic analysis of repeated bouts of eccentric exercise. *J Sports Sci*, 19(3), 163-170.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D.,...Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc*, 45, 186-205.
<http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0b013e318279a10a>
- Middleton, P., Puig, P., Trouve, P., Roulland, R. & Fleury, P. (1993) Eccentric muscular work, muscle and tendon injuries. *Sports Medicine*, 145-165.
- Middleton, P. & Montero, C. (2004) Le travail musculaire excentrique: intérêts dans la prise en charge thérapeutique du sportif. *Annales de réadaptation et de médecine physique* 47, 282-289.
- Mironov, V. & Schinkar, S. (1995). Die Intensivierung der konditionellen und funktionellen Vorbereitung als wichtiges Trainingsprinzip hochqualifizierter Turner. *Leistungssport*, 6(3), 42-45.
- Monod, H. & Flandrois, R. (2000). *Physiologie du sport. Bases physiologiques des activités physiques et sportives* (Collection Médecine du Sport. 4ème édition). Paris: Masson.
- Murayama, M., Nosaka, K., Yoneda, T., & Minamitani, K. (2000). Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*, 82(5-6), 361-367.
- Newton, M. J, Morgan, G.T., Sacco, P., Chapaman, D. W. & Nosaka, K. (2008). Comparison of responses to strenuous eccentric exercise of the elbow flexors between resistance-trained and untrained men. *J Strength Cond Res*, 22(2), 597-607.
[doi:10.1519/JSC.0b013e3181660003](http://dx.doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181660003)
- Nosaka, K. & Clarkson, P. M. (1995). Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 27(9), 1263-1269.
- Patton, H. D., Sundstein, J. W., Crill, W. E. & Swanson, P. D (1976). *Introduction to Basic Neurology*. Philadelphia: WD SAUNDERS.

- Perrey, S. (2009). Physiologie de la contraction musculaire excentrique et aspects énergétiques. Dans A. Croisier, J. L. & Codine, P. *Exercice musculaire excentrique* (1-6). Paris : Masson.
- Platonov, V.N. (1988). *L'entraînement sportif : théorie et méthodologie*. Paris : Revue EPS.
- Plisk, S. S. & Stone, M. H. (2003). Periodization strategies. *Strength Cond* 25, 19-37.
- Pozzo, T. & Studeny, C. (1987). *Théorie et pratique des sports acrobatiques*. Paris: Vigot.
- Rooney, K. J., Herbert, R. D. & Balnave, R. J. (1994). Fatigue contributes to the strength training stimulus. *Med Sci Sports Exerc* 26, 1160-1164.
- Roulland, R. (2003). Les ischio-jambiers du footballeur: isocinétisme et prévention. *Kinésithérapie scientifique*, 437, 31-36.
- Sahlin, K. & Ren, J. M. (1989). Relationship of contraction capacity to metabolic changes during recovery from a fatiguing contraction. *J Appl Physiol* 67, 648-654.
- Schärer, C. & Hübner, K. (2016). Accuracy of prediction of maximum resistance at increased holding times based on a three seconds maximum static strength test of the three main strength elements on rings. *Science of Gymnastics Journal*, 8(2), 125-134.
- Schärer, C., Tacchelli, L., Beat, G., Micah, G., Lüthy, F., Wolfgang, T., & Klaus, H. (2018). Exzentrisches Krafttraining verbessert die Maximalkraft der oberen Extremitäten. Trainingsintervention mit dem neuen Trainingsgerät 1080 Quantum Syncro zur Verbesserung von Krafthalteelementen an den Ringen im Kunstturnen. *Swiss Olympic Science Award 2018, Book of Posters*, 12.
- Schmitz, R. J. & Westwood, K. C. (2001). Knee Extensor Electromyographic Activity-to-Work Ratio is Greater with Isotonic than Isokinetic Contractions. *J Athl Train*, 36(4), 384-387.
- Smith, R. C. & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength training. I. A comparison of eccentric and concentric contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 71(4), 332 - 336.
- Tee, J. C., Bosch, A. N. & Lambert, M. I. (2007). Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Med*, 37(10), 827-36.
- Weineck, J. (1999). *Manuel d'entraînement*. Paris : Vigot.
- Westing, S. H. & Seger, J. Y. (1989). Eccentric and concentric torque velocity characteristics, torque output comparisons and gravity effect torque corrections for the quadriceps and hamstrings muscles in female. *J Sports Med*, 10, 175-180.

- Whinton, A. K., Thompson, K. M. A., Power, G. A., & Burr, J. F. (2018). Testing a novel isokinetic dynamometer constructed using a 1080 Quantum. *PLoS ONE* 13(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201179>
- Wilk, K. E., Reinold, M. M. & Andrews, J. R. (2009). *The Athlete's Shoulder* (2nd Edition). Philadelphia: Churchill Livingstone Elsevier.

Annexes

Annexe 1: Tableau représentant les valeurs de force maximale (F_{max}) par bloc de tous les gymnastes

Annexe 2 : Tableau représentant les valeurs de force moyenne (F_{moy}) par bloc de tous les gymnastes

Annexe 3 : Tableau représentant les valeurs du temps sous tension (T_{psT}) à $> 50\%$ de la force maximale par bloc de tous les gymnastes

Annexe 4 : Tableau représentant les valeurs du temps sous tension (T_{psT}) à $> 80\%$ de la force maximale par bloc de tous les gymnastes

Annexe 1 : Force maximale (Fmax) par bloc de tous les gymnastes

Blocs	Gymnaste 1	Gymnaste 2	Gymnaste 3	Gymnaste 4	Gymnaste 5	Gymnaste 6	Gymnaste 7	Gymnaste 8	Gymnaste 9	Moyenne Fmax	Ecart-type Fmax
T1_C1	144,44	288,70	303,49	235,25	191,43	320,55	305,56	277,22	300,90	263,06	60,22
T1_C2	85,90	262,22	300,03	245,51	173,95	207,99	219,81	242,82	265,31	222,62	62,85
T1_C3	93,00	246,68	295,39	232,62	160,23	263,65	218,47	224,30	278,19	223,61	62,70
T1_C4	109,89	249,02	302,78	204,43	173,13	198,38	216,62	225,52	264,22	216,00	55,43
T1_C5	138,25	320,33	315,41	255,71	256,25	320,53	304,54	281,10	368,92	284,56	65,28
T1_C6	146,61	271,18	276,63	225,27	198,16	288,14	248,42	270,15	249,35	241,55	45,23
T1_C7	122,79	263,54	243,22	171,47	191,45	277,33	211,26	231,10	242,04	217,13	48,67
T1_C8	138,91	261,06	261,15	212,66	172,38	243,60	233,41	238,34	271,48	225,89	44,28
T2_C1	221,61	320,87	316,33	302,80	190,92	298,24	287,69	268,88	281,94	276,59	43,69
T2_C2	214,98	280,03	308,34	231,44	203,10	293,07	226,51	234,04	270,47	251,33	37,32
T2_C3	169,16	245,07	326,86	208,44	192,73	254,59	197,58	245,68	243,30	231,49	46,40
T2_C4	165,73	248,98	265,57	186,01	203,64	212,79	201,51	219,70	246,90	216,76	32,23
T2_C5	230,29	319,81	325,76	241,95	228,20	281,19	299,33	267,78	265,78	273,34	36,41
T2_C6	159,08	317,14	286,54	206,53	190,96	317,89	232,49	248,42	245,63	244,97	54,99
T2_C7	139,42	270,34	315,29	170,20	184,74	194,44	233,27	215,37	258,36	220,16	54,95
T2_C8	151,70	209,83	275,06	168,46	201,73	198,12	233,32	203,68	256,30	210,91	39,19
T3_C1	243,35	320,74	308,62	254,96	206,22	262,58	284,19	264,25	300,35	271,69	35,80
T3_C2	171,24	300,44	311,32	217,19	183,18	222,29	242,34	243,55	264,92	239,61	47,66
T3_C3	172,68	272,41	293,41	187,95	171,40	220,14	233,06	248,07	279,72	230,98	46,37
T3_C4	219,02	320,88	346,91	268,24	217,80	257,74	337,08	257,61	254,94	275,58	48,19
T3_C5	187,83	295,24	308,56	197,99	201,05	182,88	252,48	263,22	241,23	236,72	46,93
T3_C6	132,57	249,92	296,45	188,49	210,12	173,14	238,11	200,19	240,03	214,34	48,09
T3_C7	175,80	320,72	342,04	211,93	227,62	251,35	251,51	264,15	269,59	257,19	51,30
T3_C8	121,78	257,78	277,07	164,31	188,57	236,29	220,58	227,89	241,90	215,13	48,75
T3_C9	125,13	229,65	296,36	156,30	174,83	152,12	211,74	226,21	239,81	201,35	53,62
T4_C1	229,43	320,84	357,07	289,03	208,67	253,81	273,24	278,49	344,69	283,92	50,14
T4_C2	185,93	319,15	323,92	244,09	194,01	276,32	250,61	285,30	291,87	263,47	49,47
T4_C3	170,80	297,27	318,97	228,29	198,95	232,19	235,18	383,90	300,30	262,87	66,94
T4_C4	190,65	320,59	362,56	327,06	164,67	285,30	271,38	305,79	276,76	278,31	63,95
T4_C5	159,17	286,43	326,95	258,95	192,11	276,68	242,52	267,63	263,66	252,68	50,16
T4_C6	134,22	231,59	296,21	211,08	194,60	209,06	232,05	262,89	279,58	227,92	48,88
T4_C7	177,34	296,42	280,45	283,83	193,56	204,84	275,76	311,16	311,15	259,39	52,54
T4_C8	173,87	262,31	287,65	243,51	254,35	226,48	229,10	294,88	258,48	247,85	36,16
T4_C9	151,88	214,13	259,71	257,02	175,28	223,76	226,86	271,57	296,35	230,73	46,28
T5_C1	217,60	316,82	380,43	320,82	196,44	310,80	273,98	308,04	296,04	291,22	55,77
T5_C2	179,10	292,87	334,19	253,79	180,53	287,87	278,78	268,50	293,69	263,26	52,11
T5_C3	163,46	277,34	314,44	249,77	172,60	266,83	301,80	289,41	268,08	255,97	53,51
T5_C4	217,99	320,77	371,09	284,43	205,62	265,06	317,24	359,45	340,25	297,99	59,16
T5_C5	171,93	278,31	322,66	229,16	204,81	217,39	345,25	327,81	266,98	262,70	60,91
T5_C6	146,70	250,69	323,86	173,22	172,96	198,60	318,88	328,19	287,06	244,46	72,93
T6_C1	224,57	300,84	346,16	233,79	214,20	264,93	359,62	332,63	270,97	283,08	54,41
T6_C2	166,17	256,00	358,62	201,63	177,39	205,90	347,35	317,66	328,86	262,18	76,94
T6_C3	151,38	244,84	312,77	187,64	196,03	179,83	318,18	320,39	329,76	248,98	71,91
T6_C4	193,20	309,02	353,18	253,19	194,63	293,55	341,92	354,79	339,28	292,53	64,66
T6_C5	172,15	247,20	326,49	205,97	174,76	210,33	322,64	310,45	322,34	254,70	66,20
T6_C6	176,34	214,74	342,90	166,94	164,45	191,48	275,20	299,20	340,28	241,28	73,71
T7_C1	195,02	320,75	357,62	203,54	194,40	289,09	361,71	349,08	332,81	289,33	72,13
T7_C2	152,55	263,96	309,07	179,71	162,03	199,62	290,57	312,28	293,93	240,41	66,17
T7_C3	129,97	242,04	270,20	159,26	163,82	181,61	251,74	344,72	293,76	226,35	71,65
T7_C4	137,89	251,37	290,16	141,44	150,21	194,00	250,24	322,44	287,96	225,08	70,85
T7_C5	198,69	281,62	368,99	242,57	187,72	220,87	358,79	432,72	277,59	285,51	84,57
T7_C6	174,49	271,37	295,07	152,47	154,47	178,72	352,48	457,29	312,07	260,93	104,98
T7_C7	147,38	206,55	273,37	178,72	141,55	209,16	316,22	362,79	286,53	235,81	77,54
T7_C8	132,05	216,62	310,52	173,18	144,71	184,61	327,41	359,45	320,03	240,96	88,10
T7_C9	173,64	306,85	361,07	259,01	187,24	223,54	378,21	436,54	315,17	293,48	89,85
T7_C10	133,42	236,38	326,50	132,87	144,98	204,09	350,49	429,85	332,80	254,60	109,31
T7_C11	117,35	226,26	314,27	234,91	172,78	180,79	331,90	344,86	284,84	245,33	79,06
T7_C12	130,56	225,08	323,09	147,17	138,37	181,84	305,58	343,25	320,02	234,99	88,44
T8_C1	225,84		419,12	248,52	174,15	276,48	296,38	438,08	261,42	292,50	91,69
T8_C2	161,21	263,08	338,37	224,35	190,14	247,54	308,00	416,11	259,08	267,54	77,77
T8_C3	136,62	260,36	329,64	217,18	155,26	195,69	327,51	453,45	245,26	257,89	99,48
T8_C4	133,40	238,95	327,80	206,18	143,72	225,41	321,72	463,43	256,32	257,44	102,37
T8_C5	187,95	315,50	412,11	260,97	180,02	289,61	413,54	426,72	276,65	307,01	93,84
T8_C6	154,91	271,92	359,94	215,27	199,33	280,94	344,67	438,31	254,98	280,03	88,51
T8_C7	128,10	241,97	353,72	175,24	168,18	277,31	296,50	412,86	254,32	256,47	91,54
T8_C8	147,28	234,66	369,56	167,20	160,26	249,18	288,56	394,03	250,82	251,28	88,18
T8_C9	179,62	274,70	404,03	190,19	189,86	295,02	356,65	439,88	267,24	288,58	95,42
T8_C10	133,28	238,21	390,45	201,02	149,42	276,85	338,56	386,61	251,21	262,85	94,70
T8_C11	124,86	221,49	348,54	153,38	178,40	238,89	337,08	359,49	248,53	245,63	86,73
T8_C12	156,94	224,70	343,40	176,42	156,51	224,66	324,42	356,29	265,28	247,62	78,93

Annexe 2 : Force moyenne (Fmoy) par bloc de tous les gymnastes

Blocs	Gymnaste 1	Gymnaste 2	Gymnaste 3	Gymnaste 4	Gymnaste 5	Gymnaste 6	Gymnaste 7	Gymnaste 8	Gymnaste 9	Moyenne Fmoy	Ecart-type Fmoy
T1_C1	94,80	197,93	207,44	155,19	142,50	193,37	177,20	195,04	137,19	166,74	37,11
T1_C2	57,19	184,25	168,68	157,61	133,03	131,48	139,99	161,58	132,60	140,71	36,38
T1_C3	56,26	173,43	144,77	141,75	123,56	141,40	133,20	147,58	130,85	132,53	31,85
T1_C4	74,99	155,34	153,32	126,20	117,10	118,92	128,01	154,06	122,59	127,84	25,28
T1_C5	101,01	211,12	191,48	181,35	146,97	187,60	164,90	177,64	180,22	171,37	31,73
T1_C6	102,37	190,69	148,55	135,83	117,76	122,11	146,30	136,72	141,48	137,98	24,76
T1_C7	78,54	143,15	137,51	120,48	116,79	103,19	129,75	147,36	126,85	122,62	21,46
T1_C8	89,05	144,02	125,35	119,84	100,04	116,73	117,80	131,00	127,03	118,99	16,35
T2_C1	141,02	221,73	188,32	197,96	132,67	186,46	183,02	165,95	141,08	173,13	30,07
T2_C2	120,81	196,61	150,14	157,75	123,17	151,01	139,24	148,52	120,46	145,30	23,97
T2_C3	83,56	168,72	146,57	126,22	116,62	141,56	137,11	135,24	108,13	129,30	24,52
T2_C4	82,71	126,93	140,68	134,77	117,88	121,23	123,97	124,79	124,56	121,95	16,26
T2_C5	138,23	219,10	176,59	174,90	147,66	163,36	170,90	149,06	132,50	163,59	26,23
T2_C6	90,02	176,48	147,59	119,12	134,99	128,30	132,10	140,52	118,33	131,94	23,54
T2_C7	77,54	150,93	135,11	113,41	127,51	98,08	115,88	112,32	117,40	116,46	21,03
T2_C8	75,80	103,19	131,89	107,64	114,15	101,28	128,33	105,65	127,91	110,65	17,56
T3_C1	149,10	211,97	184,74	195,66	147,34	175,92	181,37	174,53	151,20	174,65	22,17
T3_C2	109,93	198,44	162,27	151,73	125,11	135,98	150,84	154,64	138,00	147,44	25,07
T3_C3	88,15	169,25	153,47	127,53	127,04	129,02	133,70	141,62	126,71	132,94	22,19
T3_C4	133,14	224,05	179,51	171,36	156,60	171,51	172,04	157,28	142,40	167,55	26,05
T3_C5	98,38	159,71	153,98	117,94	127,26	131,49	142,22	134,98	119,00	131,66	18,98
T3_C6	66,04	143,91	137,75	105,08	117,83	105,23	125,48	111,89	113,24	114,05	22,55
T3_C7	98,69	193,91	159,93	129,40	150,61	153,32	141,87	140,73	156,10	147,17	25,52
T3_C8	70,65	127,57	140,63	98,22	122,70	111,50	122,98	102,47	124,99	113,52	20,72
T3_C9	70,84	121,64	127,93	82,61	107,92	92,82	111,51	111,64	116,78	104,85	18,88
T4_C1	132,80	223,66	164,76	171,40	132,24	193,41	157,67	174,12	150,39	166,72	28,99
T4_C2	103,73	190,35	142,90	151,49	127,53	159,83	135,53	161,98	122,88	144,02	25,47
T4_C3	84,44	165,97	139,10	133,82	119,81	135,70	125,65	163,20	131,08	133,20	24,07
T4_C4	124,82	221,83	163,97	176,54	122,08	154,50	154,01	170,08	136,60	158,27	30,57
T4_C5	91,88	165,62	137,49	146,49	125,82	133,46	134,51	138,39	122,00	132,85	19,88
T4_C6	76,97	126,59	124,57	122,17	111,56	115,83	129,56	128,92	120,03	117,36	16,27
T4_C7	97,64	176,81	124,12	146,94	121,24	134,28	140,58	152,43	158,48	139,17	23,25
T4_C8	81,35	156,39	113,90	116,26	128,69	111,10	128,04	131,63	144,05	123,49	21,48
T4_C9	74,27	127,65	110,64	119,22	114,61	100,92	122,59	177,66	158,38	122,88	30,33
T5_C1	136,71	221,40	166,37	198,84	141,97	199,57	171,93	160,10	151,59	172,05	28,85
T5_C2	117,22	192,34	155,31	154,02	131,02	138,70	142,99	212,78	140,49	153,87	30,30
T5_C3	89,70	179,65	144,10	144,02	120,64	124,03	143,03	199,77	139,45	142,71	32,17
T5_C4	140,85	218,36	166,12	165,93	150,04	173,89	149,28	238,32	155,14	173,10	33,29
T5_C5	99,66	162,88	141,04	119,63	131,48	124,76	145,22	209,30	134,44	140,94	31,07
T5_C6	81,55	130,59	124,38	102,82	115,16	116,53	136,01	206,47	155,04	129,84	35,41
T6_C1	125,90	200,25	167,47	158,47	135,52	185,20	147,10	164,31	139,66	158,21	24,10
T6_C2	103,53	166,23	148,27	128,72	131,21	141,07	144,79	227,96	167,75	151,06	34,86
T6_C3	91,39	142,17	135,30	110,11	119,76	119,21	144,49	225,14	152,46	137,78	37,92
T6_C4	129,99	189,62	157,49	164,82	146,96	181,10	156,81	232,57	156,93	168,48	29,71
T6_C5	110,59	143,97	138,12	125,88	124,97	125,73	140,79	202,69	148,64	140,15	26,26
T6_C6	94,94	131,18	131,15	104,80	107,82	111,07	121,25	200,12	140,01	126,92	31,07
T7_C1	130,07	214,08	164,42	138,86	144,08	203,53	144,81	176,37	132,74	161,00	30,96
T7_C2	100,76	156,02	147,47	124,87	122,50	131,81	149,28	151,71	119,26	133,74	18,56
T7_C3	88,06	132,09	126,05	111,66	114,52	118,27	125,84	146,04	113,21	119,53	16,05
T7_C4	78,53	139,12	120,56	86,43	102,41	114,20	117,49	200,88	108,18	118,64	35,75
T7_C5	118,14	177,07	144,60	139,71	138,74	166,49	153,17	172,39	131,06	149,04	19,82
T7_C6	93,78	141,97	121,62	97,49	107,73	118,05	141,10	169,76	131,49	124,78	24,19
T7_C7	83,29	122,50	119,74	94,93	99,73	141,63	132,31	127,88	128,24	116,69	19,51
T7_C8	78,60	116,39	114,89	91,80	90,49	113,71	112,89	134,92	121,16	108,32	17,69
T7_C9	114,75	164,23	140,78	140,55	118,69	152,31	141,80	153,16	149,93	141,80	16,11
T7_C10	81,74	132,40	116,87	86,94	90,12	123,38	122,78	131,97	135,48	113,52	21,32
T7_C11	73,66	114,32	116,21	99,33	106,01	105,64	112,93	139,29	132,07	111,05	18,94
T7_C12	78,27	113,33	107,15	83,57	84,46	98,42	102,76	115,54	131,42	101,66	17,41
T8_C1	125,07		160,57	186,17	137,96	186,09	138,17	203,78	141,11	159,86	28,84
T8_C2	98,94	177,03	139,72	154,10	131,78	163,33	136,12	231,65	153,21	153,99	36,57
T8_C3	82,12	161,00	134,02	131,41	114,24	133,87	130,16	215,33	150,75	139,21	36,20
T8_C4	79,62	143,87	127,28	137,30	95,10	128,93	124,37	163,83	136,95	126,36	25,29
T8_C5	115,62	219,66	164,95	141,26	137,11	205,78	156,18	167,13	116,16	158,20	36,20
T8_C6	111,89	161,71	136,74	140,74	122,51	179,78	129,33	147,71	89,07	135,50	26,80
T8_C7	90,16	126,02	124,25	98,51	97,01	165,35	118,78	128,50	126,29	119,43	22,64
T8_C8	81,11	123,34	114,63	95,48	94,08	139,35	112,03	181,89	135,65	119,73	30,29
T8_C9	130,39	154,66	152,27	107,02	119,24	202,29	137,56	237,32	139,63	153,37	41,42
T8_C10	82,55	120,50	132,42	120,82	102,13	156,72	127,73	189,81	151,16	131,54	31,49
T8_C11	74,26	110,73	122,41	91,20	96,72	124,19	117,39	110,19	139,19	109,59	19,59
T8_C12	105,68	122,96	119,78	88,26	101,42	111,06	119,23	111,09	122,76	111,36	11,52

Annexe 3 : Temps sous tension (TpsT) à > 50% de la Fmax par bloc de tous les gymnastes

Blocs	Gymnaste 1	Gymnaste 2	Gymnaste 3	Gymnaste 4	Gymnaste 5	Gymnaste 6	Gymnaste 7	Gymnaste 8	Gymnaste 9	Moyenne, tot 50%	Ecart-type à 50%
T1_C1	26,08	23,45	25,48	18,60	20,41	24,89	19,61	25,56	10,80	21,65	4,95
T1_C2	23,13	22,77	18,10	20,53	29,38	22,28	23,82	23,28	10,15	21,49	5,21
T1_C3	17,18	20,70	12,90	18,55	27,31	17,17	26,32	23,62	10,36	19,35	5,75
T1_C4	24,59	19,19	14,64	22,22	27,65	18,81	22,45	22,25	12,27	20,45	4,80
T1_C5	25,62	22,29	20,87	26,62	26,57	20,12	18,82	24,12	12,90	21,99	4,44
T1_C6	23,56	20,64	17,10	20,45	24,50	8,47	23,99	15,02	20,33	19,34	5,15
T1_C7	22,43	18,87	19,54	25,27	22,85	5,25	23,61	22,79	17,26	19,76	6,01
T1_C8	23,91	14,88	13,87	16,98	20,75	9,99	17,67	18,54	11,94	16,50	4,35
T2_C1	25,04	24,77	20,82	24,60	25,98	23,84	25,23	19,46	19,24	23,22	2,63
T2_C2	20,72	23,81	15,06	26,12	22,91	14,65	22,65	22,07	10,57	19,84	5,17
T2_C3	11,37	23,82	15,12	23,50	24,70	19,66	25,44	20,86	12,33	19,64	5,42
T2_C4	12,22	17,69	15,95	31,74	21,48	16,69	20,40	22,66	17,87	19,63	5,52
T2_C5	23,93	27,38	18,54	27,56	26,72	29,70	22,05	22,47	17,74	24,01	4,17
T2_C6	22,68	20,04	17,81	21,68	28,25	8,46	18,08	22,26	15,21	19,39	5,53
T2_C7	16,85	18,59	12,18	28,13	27,87	15,57	15,86	17,79	13,40	18,47	5,76
T2_C8	9,54	12,68	15,77	25,41	20,76	16,95	19,63	20,39	16,75	17,54	4,70
T3_C1	22,14	27,63	18,80	29,75	30,98	29,91	25,19	23,25	15,45	24,79	5,36
T3_C2	26,89	26,58	14,78	29,52	29,93	24,08	22,84	21,70	18,53	23,87	5,02
T3_C3	13,69	26,01	15,66	30,00	29,31	28,75	21,40	22,40	15,18	22,49	6,45
T3_C4	22,61	28,36	15,93	26,49	29,34	29,58	18,13	21,53	16,99	23,22	5,43
T3_C5	15,94	17,66	15,83	24,62	27,97	31,26	18,60	21,64	17,40	21,21	5,58
T3_C6	11,30	20,00	13,08	18,55	22,20	24,49	16,34	20,26	15,22	17,94	4,31
T3_C7	19,65	23,63	13,78	23,06	30,53	28,73	18,63	20,96	18,62	21,95	5,23
T3_C8	22,11	13,44	14,67	20,93	28,51	17,28	19,11	16,84	17,54	18,94	4,52
T3_C9	20,88	15,60	11,75	13,58	18,34	23,65	18,45	21,29	16,67	17,80	3,82
T4_C1	19,16	29,54	11,87	26,55	30,87	31,06	19,36	22,09	7,99	22,05	8,31
T4_C2	19,12	23,27	12,18	24,85	28,89	28,11	17,54	20,58	9,67	20,47	6,63
T4_C3	12,25	19,68	12,05	23,16	29,20	26,78	15,91	19,86	12,27	19,02	6,44
T4_C4	28,19	29,66	14,43	22,07	30,59	21,35	18,45	23,26	16,67	22,74	5,77
T4_C5	22,19	22,85	13,00	21,28	27,70	14,56	18,14	21,34	12,32	19,26	5,15
T4_C6	20,90	16,90	12,19	21,88	22,46	20,33	17,26	20,77	10,66	18,15	4,26
T4_C7	19,12	24,58	12,81	19,06	26,80	28,99	16,76	21,87	19,31	21,03	5,08
T4_C8	10,92	23,16	12,23	13,05	18,44	15,31	17,87	20,20	19,38	16,73	4,10
T4_C9	14,70	22,83	12,50	12,80	30,28	11,35	14,95	19,68	18,26	17,48	6,09
T5_C1	26,01	27,26	11,01	28,55	33,04	33,41	21,50	19,50	19,90	24,46	7,21
T5_C2	30,65	27,88	13,60	25,59	31,73	14,63	16,53	19,62	11,31	21,28	7,80
T5_C3	20,49	25,22	13,20	21,54	31,43	11,73	13,67	18,16	19,08	19,39	6,29
T5_C4	28,92	30,65	12,67	26,88	32,93	31,53	15,90	18,48	12,83	23,42	8,36
T5_C5	23,23	21,99	13,55	16,92	29,63	25,04	10,74	19,59	14,67	19,48	6,08
T5_C6	19,16	18,78	11,52	21,79	30,79	23,00	11,76	16,32	14,12	18,58	6,13
T6_C1	19,86	27,97	14,78	27,93	28,29	30,28	11,54	20,63	18,70	22,22	6,68
T6_C2	22,98	26,14	12,83	26,70	26,96	31,03	11,01	19,29	15,64	21,40	7,03
T6_C3	24,10	20,98	14,33	22,57	23,47	27,43	12,63	19,33	9,44	19,36	5,98
T6_C4	29,25	24,45	13,57	28,50	29,66	28,10	15,17	21,11	12,84	22,52	7,04
T6_C5	22,86	20,25	12,46	23,50	28,82	23,12	10,76	19,20	10,40	19,04	6,47
T6_C6	15,16	21,32	11,75	24,75	27,57	21,26	13,69	19,79	6,69	18,00	6,67
T7_C1	27,15	23,90	15,05	27,19	29,80	30,08	11,21	20,84	4,79	21,11	8,93
T7_C2	26,95	20,95	15,18	29,07	30,69	28,58	15,08	22,01	6,08	21,62	8,23
T7_C3	28,33	16,08	16,14	27,39	29,17	24,99	15,16	20,61	4,97	20,31	8,00
T7_C4	19,01	16,22	13,20	22,84	29,39	20,26	13,72	18,32	6,14	17,68	6,55
T7_C5	26,07	22,99	12,20	23,34	29,50	30,09	13,82	15,77	11,49	20,59	7,38
T7_C6	17,65	15,93	13,35	26,61	29,58	27,46	11,51	13,72	7,75	18,17	7,82
T7_C7	17,04	18,97	14,39	16,77	29,67	27,96	12,44	12,30	7,57	17,46	7,26
T7_C8	22,60	15,95	11,06	19,06	26,97	25,77	10,31	10,66	6,00	16,48	7,52
T7_C9	30,19	17,34	13,18	21,64	29,72	29,53	10,31	10,71	10,59	19,25	8,72
T7_C10	24,95	18,89	12,19	26,37	28,18	22,99	10,17	5,03	8,27	17,45	8,68
T7_C11	23,53	15,84	12,83	8,88	24,34	22,45	8,62	9,62	10,25	15,15	6,62
T7_C12	22,28	15,47	9,39	17,62	25,25	16,73	9,89	7,91	9,63	14,91	6,17
T8_C1	21,07		11,26	30,98	28,90	28,09	16,10	19,40	12,76	21,07	7,57
T8_C2	24,66	26,39	13,13	28,79	28,16	28,84	11,91	16,60	11,13	21,07	7,72
T8_C3	21,34	22,13	12,05	22,64	28,33	28,80	11,94	9,76	11,88	18,77	7,46
T8_C4	24,02	25,16	12,29	29,21	27,25	19,48	11,01	8,12	11,60	18,68	8,04
T8_C5	25,50	29,50	11,91	20,38	31,72	29,82	10,89	16,37	12,80	20,99	8,36
T8_C6	29,94	21,36	12,58	26,17	29,29	25,02	10,80	10,80	7,34	19,25	8,87
T8_C7	21,77	17,26	11,00	19,35	25,00	22,19	10,35	9,44	10,24	16,29	6,10
T8_C8	18,87	18,82	9,45	18,67	24,61	18,33	9,74	6,86	15,57	15,66	5,78
T8_C9	29,18	21,77	11,89	24,16	28,53	31,00	8,42	10,67	12,89	19,84	8,91
T8_C10	23,97	15,14	12,17	22,76	21,22	19,66	8,58	9,69	13,27	16,27	5,78
T8_C11	23,00	18,03	9,74	21,33	20,65	14,47	8,27	9,19	12,56	15,25	5,67
T8_C12	29,31	20,37	11,09	11,17	29,69	11,99	7,48	9,21	15,02	16,15	8,42

Annexe 4 : Temps sous tension (TpsT) à > 80% de la Fmax par bloc de tous les gymnastes

Blocs	Gymnaste 1	Gymnaste 2	Gymnaste 3	Gymnaste 4	Gymnaste 5	Gymnaste 6	Gymnaste 7	Gymnaste 8	Gymnaste 9	Moyenne, tot 80%	Ecart-type à 80%
T1_C1	6,48	8,18	9,62	5,72	10,59	3,76	2,13	13,20	1,85	6,84	3,90
T1_C2	5,41	7,29	4,49	5,17	12,44	6,97	3,52	10,12	1,76	6,35	3,30
T1_C3	4,28	9,43	3,00	3,96	13,67	1,10	3,27	8,61	2,15	5,50	4,14
T1_C4	7,49	5,68	3,11	5,38	4,92	4,50	2,57	12,68	2,11	5,38	3,21
T1_C5	9,66	8,72	7,00	7,32	1,13	3,52	2,33	9,19	2,12	5,66	3,37
T1_C6	6,43	10,52	5,02	5,19	1,80	0,52	2,75	3,13	4,31	4,41	2,93
T1_C7	4,53	5,17	6,59	8,48	3,14	0,68	5,50	15,08	3,17	5,82	4,13
T1_C8	3,76	3,57	1,88	3,59	2,37	2,88	1,76	5,68	2,83	3,15	1,20
T2_C1	2,64	10,94	6,95	5,00	6,11	6,39	3,36	12,65	2,16	6,25	3,59
T2_C2	1,49	8,66	2,25	7,43	1,47	1,35	3,92	15,63	2,27	4,94	4,83
T2_C3	0,61	8,69	3,22	5,39	1,69	0,94	10,42	8,28	1,32	4,51	3,80
T2_C4	1,85	5,84	7,42	10,20	1,15	4,45	6,62	8,87	2,62	5,45	3,16
T2_C5	2,32	7,30	7,69	11,29	2,05	0,84	2,00	6,85	3,84	4,91	3,52
T2_C6	2,51	3,60	5,62	5,06	5,33	1,31	2,51	6,74	4,34	4,11	1,76
T2_C7	2,03	3,07	1,82	12,02	6,30	1,70	1,93	5,18	1,40	3,94	3,48
T2_C8	5,67	5,25	2,87	8,19	1,34	1,32	3,65	5,33	2,49	4,01	2,28
T3_C1	3,85	7,90	7,04	16,18	6,58	5,61	4,46	15,38	2,12	7,68	4,92
T3_C2	3,22	8,28	6,30	10,78	4,41	3,45	4,95	11,54	2,40	6,15	3,34
T3_C3	1,60	5,53	7,92	9,10	9,26	1,26	2,24	10,00	1,93	5,43	3,70
T3_C4	2,67	12,78	6,97	3,99	7,08	5,83	1,73	13,96	6,81	6,87	4,16
T3_C5	0,63	2,85	4,22	6,82	2,55	10,62	3,17	6,30	3,12	4,48	2,99
T3_C6	2,28	5,83	2,45	5,58	1,69	6,42	2,73	15,56	1,64	4,91	4,41
T3_C7	2,37	5,65	3,38	6,21	3,54	1,17	4,66	3,87	3,12	3,77	1,57
T3_C8	4,05	2,91	6,13	6,26	2,05	0,41	3,87	4,09	2,55	3,59	1,87
T3_C9	2,24	4,90	2,06	4,64	2,87	8,91	3,96	5,07	2,58	4,14	2,14
T4_C1	2,74	10,15	4,54	3,96	4,21	15,01	4,50	18,86	1,96	7,32	5,99
T4_C2	1,98	4,43	4,32	2,83	2,00	1,02	4,21	8,97	2,27	3,56	2,36
T4_C3	0,91	3,06	3,97	2,66	1,26	1,65	3,50	3,61	1,88	2,50	1,11
T4_C4	5,34	9,33	3,24	1,40	10,66	1,22	3,33	8,71	3,48	5,19	3,53
T4_C5	2,30	3,36	3,56	2,92	4,37	1,08	4,30	7,61	2,36	3,54	1,84
T4_C6	3,16	5,09	3,42	3,14	2,13	0,84	5,81	6,37	2,17	3,57	1,84
T4_C7	2,34	3,51	4,19	1,36	1,70	2,08	3,81	5,70	2,00	2,97	1,43
T4_C8	1,36	4,56	3,22	1,25	0,62	0,62	5,59	3,28	6,57	3,01	2,21
T4_C9	0,65	5,71	4,59	1,49	3,63	1,82	5,37	3,01	2,58	3,21	1,76
T5_C1	3,51	9,71	5,72	3,11	8,81	3,56	7,75	9,55	3,70	6,16	2,81
T5_C2	3,03	7,02	6,91	3,91	9,27	0,39	3,82	11,28	2,27	5,32	3,53
T5_C3	1,89	7,77	6,65	3,09	6,84	1,06	2,21	3,13	3,91	4,06	2,43
T5_C4	2,33	10,17	5,37	1,01	10,41	2,78	3,87	2,77	2,37	4,56	3,46
T5_C5	2,23	5,31	6,06	1,83	4,58	1,46	1,48	2,57	3,29	3,20	1,72
T5_C6	2,51	2,61	2,43	6,10	5,04	3,21	2,93	2,70	4,48	3,56	1,32
T6_C1	1,93	5,14	7,49	5,10	1,94	6,21	2,15	6,90	3,43	4,48	2,19
T6_C2	4,46	6,03	3,70	3,21	9,18	7,09	2,51	5,45	2,95	4,95	2,20
T6_C3	3,51	5,60	6,12	2,06	1,55	5,17	4,36	4,76	2,28	3,93	1,66
T6_C4	4,77	4,91	5,69	4,52	14,95	1,07	1,71	2,74	1,86	4,69	4,18
T6_C5	6,88	4,18	6,08	3,78	8,00	2,19	1,28	2,72	1,55	4,07	2,42
T6_C6	2,51	6,06	2,73	7,53	3,38	2,76	4,81	3,78	1,75	3,92	1,88
T7_C1	6,69	9,49	6,12	6,54	10,26	7,64	1,04	8,37	1,75	6,43	3,17
T7_C2	6,00	4,03	7,28	6,49	13,10	6,69	4,66	5,58	2,08	6,21	3,03
T7_C3	7,45	3,61	7,46	8,13	7,35	7,15	4,98	2,34	2,27	5,64	2,37
T7_C4	2,47	4,34	2,93	4,98	6,12	3,54	3,92	3,04	2,15	3,72	1,27
T7_C5	1,50	6,78	1,81	1,64	10,78	11,98	2,54	3,17	3,23	4,83	4,05
T7_C6	2,30	2,12	5,13	6,71	8,22	6,15	1,95	1,62	2,61	4,09	2,48
T7_C7	4,16	5,66	6,17	2,39	8,69	5,30	2,12	1,55	3,30	4,37	2,31
T7_C8	6,64	3,16	3,01	1,19	4,50	2,56	1,16	1,49	1,58	2,81	1,81
T7_C9	3,04	3,05	3,95	1,40	1,76	2,70	2,26	1,39	2,93	2,50	0,86
T7_C10	3,18	4,41	3,05	6,91	1,67	3,25	2,40	0,86	2,02	3,08	1,77
T7_C11	5,58	3,09	2,80	1,09	3,92	4,08	1,26	1,03	4,55	3,04	1,64
T7_C12	2,67	3,41	2,36	4,81	2,21	2,73	3,28	0,94	1,59	2,67	1,12
T8_C1	1,37		3,81	10,38	19,71	3,26	5,28	2,16	3,09	6,13	6,15
T8_C2	2,99	7,67	5,81	5,95	4,61	3,53	3,07	3,95	4,11	4,63	1,56
T8_C3	3,26	8,78	5,95	4,08	8,38	7,03	2,74	2,13	3,96	5,15	2,47
T8_C4	1,77	4,78	3,51	9,22	3,98	3,47	1,99	1,17	2,18	3,56	2,42
T8_C5	1,38	8,11	3,19	6,00	12,70	7,68	1,52	2,90	3,84	5,26	3,72
T8_C6	8,64	5,50	3,51	8,61	3,44	5,27	2,78	2,16	4,21	4,90	2,37
T8_C7	5,59	3,57	2,55	4,15	2,55	5,00	3,19	1,13	3,78	3,50	1,35
T8_C8	1,57	2,85	1,55	6,05	2,31	2,78	4,52	1,09	6,13	3,21	1,92
T8_C9	9,97	2,97	2,84	1,02	2,14	7,22	2,21	2,19	3,97	3,84	2,89
T8_C10	3,50	2,30	1,85	5,65	5,22	4,40	2,16	1,82	5,76	3,63	1,67
T8_C11	2,81	1,09	2,07	3,45	1,66	4,19	1,84	1,79	4,95	2,65	1,30
T8_C12	6,24	3,41	2,07	4,92	2,77	3,41	2,14	1,83	4,28	3,45	1,47

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude envers les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail de master. Plus particulièrement, mon référent Silvio Lorenzetti pour son aide et ses conseils lors de la rédaction de l'étude et mon conseiller, Christoph Schärer pour son soutien et son support tout au long de l'élaboration de cette étude.

Je remercie également tous les neufs gymnastes du cadre national Suisse participants à ce travail, sans qui celui-ci n'aurait pas eu lieu. Je vous remercie pour engagement, votre motivation et pour vos performances démontrés lors des mesures. Je vous souhaite de belles réussites sportives dans votre carrière.

Finalement, je remercie toutes les personnes qui se sont rendues disponibles pour la réalisation de cette étude. Les membres de ma famille, mes amis et mon ami qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce travail de master.