

Déterminants biomécaniques de la performance en escalade : étude de la force des membres supérieurs et de la relation force-vitesse chez les sportifs de haut niveau

Guillaume Levernier

▶ **To cite this version:**

Guillaume Levernier. Déterminants biomécaniques de la performance en escalade : étude de la force des membres supérieurs et de la relation force-vitesse chez les sportifs de haut niveau. Physiologie [q-bio.TO]. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. ⟨NNT : 2019SACLS604⟩. ⟨tel-03155655v2⟩

HAL Id: tel-03155655

https://theses.hal.science/tel-03155655v2

Submitted on 2 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

université PARIS-SACLAY

NNT : 2019SACLS604

Thèse de doctorat

UNIVERSITÉ PARIS SUD
Comprendre le monde, construire l'avenir

Déterminants biomécaniques de la performance en escalade : étude de la force des membres supérieurs et de la relation force-vitesse chez les sportifs de haut niveau

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

Préparée à l'Université Paris Sud

École doctorale n°566 :
Science du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain (SSMMH)

Spécialité de doctorat :
Science du sport et du mouvement humain

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 16/12/2019, par

Guillaume LEVERNIER

Composition du Jury :

William Bertucci
Professeur, Université de Reims (GRESPI, EA 4694) ..... Président

Jean-Benoît Morin
Professeur, Université de Nice Sophia Antipolis (LAMHESS, 6312) ..... Rapporteur

Laurent Vigouroux
MCF- HDR, Université Aix-Marseille (UMR, 7287) ..... Rapporteur

Laetitia Fradet
MCF, Université de Poitiers (PPRIME, UPR 3346) ..... Examinateur

Alain Hamaoui
Professeur, Université Paris Sud / Paris Saclay (CIAMS, EA 4532) ..... Examinateur

Guillaume Laffaye
MCF-HDR, Université Paris Sud / Paris Saclay (CIAMS, EA 4532) ..... Directeur de thèse

Pierre-Henri Paillasson
Directeur Technique National, FFME ..... Invité

Titre : Déterminants biomécaniques de la performance en escalade : étude de la force des membres supérieurs et de la relation force-vitesse chez les sportifs de haut niveau

Mots clés : taux de développement de la force, doigts, entrainement, force maximale externe, relation force-vitesse-puissance.

Résumé : Ce travail de thèse s'est intéressé à la production de force externe ainsi qu'à la relation force-vitesse-puissance des membres supérieurs chez les sportifs de haut niveau en escalade.

La première partie de l'étude s'est focalisée sur deux aspects clefs dans la performance : la force maximale volontaire (FMV) des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que le taux de développement de la force (RFD). Un protocole de mesure a été mis au point et sa fiabilité a été vérifiée. Cela a permis de montrer qu'un entrainement spécifique de seulement 4 semaines permettait déjà d'engendrer des évolutions spécifiques au niveau du RFD.

Ce protocole a également vérifié l'hypothèse que la force maximale et le RFD étaient supérieurs chez les grimpeurs de haut niveau : la différence par rapport aux autres sportifs, y compris les grimpeurs confirmés, est significative. De même, ce protocole a confirmé que la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que le RFD diffèrent significativement selon la discipline : ils sont plus élevés chez les grimpeurs de bloc que chez les spécialistes de la difficulté.

La seconde partie de ce travail a étudié un troisième déterminant clef de la performance en escalade : la production de force externe des muscles des bras à différentes vitesses. Un test de tractions lestées a été mené sur des groupes de grimpeurs de haut niveau représentatifs de chacune des 3 disciplines : bloc, difficulté et vitesse. Il a ainsi été montré qu'il existe d'importantes différences, du point de vue de la relation force-vitesse-puissance, selon la discipline. Les grimpeurs de bloc présentent notamment une production de force à vitesse rapide significativement supérieure à celle des deux autres disciplines. Par contre, la production de force à vitesse lente n'est pas discriminante entre les 3 groupes.

En conclusion, ce travail a démontré que l'évaluation quantitative des facteurs déterminants biomécaniques pourrait compléter utilement les outils qualitatifs à la disposition de l'entraineur. Ainsi, selon la discipline et les prochaines échéances sportives, il pourra définir un entrainement spécifique et suivre de façon objective les résultats obtenus par le grimpeur.

Title : Biomechanical determinants of performance in climbing : study of the strength of the upper limbs and the force-velocity-power relationship in high level athletes

Keywords : rate of force development, finger, training, maximal strength, Force-velocity-power relationship

Abstract: This PhD work was interested in the production of force output and the force-velocity-power relationship of the upper limb in high-level climbing athletes. The first part of the study focused on two key aspects of performance: the maximal voluntary contraction (MVC) of fingers' flexor muscles and the rate of force development (RFD). A measurement protocol was set up and the reliability was checked. This showed that a 4-weeks-only specific training has an impact on RFD evolution.

This protocol also checked the fact that high-level climbers have higher MVC and RFD: the difference between them and other athletes, including advanced climbers, is significant. Likewise, this protocol confirmed that fingers flexor muscles maximum contraction and RFD significantly differ depending on the discipline: they are higher in bouldering climbers than in lead climbing ones.

The second part of this work studied a third key determinant of performance in climbing: the arms muscles external force production at different speeds. A test was run on panels of high-level climbers representatives of the three disciplines: bouldering, lead climbing and speed climbing. It resulted in major differences in the force-velocity-power relationship depending on the discipline. Bouldering climbers notably showed a force production at high speed rate significantly higher than the two other groups. However, at lower speed rate, the force production was not a discriminative criteria between the three groups.

To conclude, this work showed that the quantitative assessment of determinant biomechanical factors could be beneficial as a complement to qualitative tools available to coaches/trainers. Thus, depending on the discipline and upcoming sport deadlines, a specific training could be set up and an unbiased follow-up of the climbers' performances could be obtained.

– Remerciements –

10 ans...

Cela va faire maintenant 10 ans que l'escalade est devenue centrale dans ma vie. Il s'agit bien plus qu'une simple pratique, c'est une culture, un mode de vie. Dix ans après ce coup de coeur, j'achève en toute humilité un doctorat sur les déterminants biomécaniques de la performance chez des sportifs de haut niveau en escalade. Je peux maintenant l'avouer : je me suis énormément investi pour en arriver là. Et le chemin qu'il reste à parcourir est encore long. Mais les épreuves que j'ai déjà franchies, je ne les ai jamais affrontées seul. Tant de personnes ont été présentes tout au long de cette aventure et il serait illusoire de pouvoir remercier tout le monde. Je vais tout de même tenter de faire quelques remerciements.

Merci tout d'abord à Laurent Vigouroux et à Jean-Benoît Morin de rapporter mon travail, ainsi qu'à William Bertucci, Laetitia Fradet et Alain Hamaoui qui ont accepté de faire partie de mon jury. J'espère que ce travail est à la hauteur de vos attentes. Merci d'ailleurs au DTN de la Fédération Française de la Montagne et de l'escalade de participer à la soutenance.

Pour Guillaume Laffaye, mon directeur de recherche, nous nous connaissons depuis quelques années. Tu m'as guidé dans mes débuts et merci beaucoup pour la confiance accordée ainsi que pour l'autonomie laissée durant ce travail doctoral. Tout ceci n'aurait pas été possible sans toi.

Merci à mon professeur d'EPS de mon lycée ainsi qu'à mon enseignant d'option escalade à l'Université (Jean-Mi). Vous ne vous en rendez sûrement pas compte mais vous avez cultivé ma passion pour l'escalade.

Merci Pierre Samozino, pour ta bienveillance, ta disponibilité et tes conseils avisés. J'ai énormément appris grâce à toi et serai très heureux de continuer à pouvoir échanger.

A tous les entraineurs de l'équipe de France d'escalade (Nicolas Januel, Remi Samyn, Sylvain Chapelle, Cécile Avezou) ; merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de réaliser un nombre de mesures considérables sur l'ensemble des grimpeurs. J'espère continuer à collaborer avec vous. Bien entendu, je remercie également tous les grimpeurs qui ont participé

à mes tests. Votre rigueur m'a permis d'obtenir des résultats, qui j'espère à terme, permettront de mieux comprendre et d'optimiser la performance en escalade.

Merci à Marie G., tu m'as aidé dans les moments difficiles. J'apprécie ta rigueur et ta franchise. Dans ce sens, je remercie également Caro T, Nicolas V, Bastien B, Alexandra P, Carole C, pour leur disponibilité et leurs précieux conseils lors de la préparation de ma soutenance.

Pour tous les doctorants, vous êtes bien plus que mes collègues. Merci pour tous ces moments partagés qu'ils aient été heureux ou malheureux Je ne peux pas tous vous citer mais quelques noms me semblent indispensables : Ariane (tu es au top, merci), Simon, Ombeline, Thomas, les deux Elodie, Adrien, Sylvain, Florian, Anne, Fanny, Dorian....

Pour tous les grimpeurs que j'ai pu entrainer (Sergio P, Agathe C, Alex W, Ludo D, Gael G, Alice G, Esther I, Victor L, Romain T, Emile R, Matthias et Adam B, Francis J, Joseph C et bien d'autres) ; je suis très fier d'avoir pu vous préparer et vous accompagner lors de vos échéances nationales et internationales. Et bien entendu, merci à tous les grimpeurs qui continuent de me faire confiance (Mélissa L, Théo L, Eloi C). Je n'ai aucun doute sur le fait que le travail que nous réalisons ensemble portera ses fruits.

La compétition c'est bien, mais le loisir c'est cool aussi ! Merci à tous les grimpeurs que j'ai encadrés à l'Usby escalade durant ces années. Vous m'avez été d'une grande aide (Thomas, Cédric, Fabien, ...).

Une mention spéciale pour Martin et Benoît. Vous êtes certainement les amis qui me connaissent le mieux. Merci pour votre aide. Sans vous, rien n'aurait été possible. Bien entendu, merci aussi à Max, Gui A, Loulou, Lambert, Florian, Gaétan, Manon.

Je commence à manquer de place, par conséquent, merci à toutes ces personnes qui partagent mon quotidien mais églament à ceux que je croise moins souvent mais que j'apprécie énormément : Alexandra M, Augustin R, Allan M, Sylvie M, François F, Paul D, Titouan B, Ludovic H, Benjamin T, Pierre B, Nicolas V, Nicolas M, Mathieu D, Jean Gilles A, Jean J, Maurine B et bien d'autres. J'espère que ceux que je n'ai pas pu citer par manque de place ne m'en voudront pas.

Mes derniers remerciements vont à ma famille.

Merci à Marie-Claude pour ses relectures, sans quoi ce manuscrit comporterait encore de nombreuses fautes. Merci à Adèle pour son aide en anglais. Sans toi, j'aurais très honte de

mon résumé. Bien entendu, je remercie l'ensemble de ma famille qui m'a épaulé durant ce long travail.

Pour mes frères, Nicolas et Etienne ; nous sommes tous les trois très différents mais nous nous retrouvons sur notre envie de comprendre le monde qui nous entoure. Continuez à briller dans votre vie et j'essaierai de faire de même.

Enfin pour terminer, mes derniers remerciements vont à ma mère et à mon père. Vous êtes mes deux meilleurs supporters. Toujours présents quand il le faut, je vous dois tout. Dix pages ne suffiraient pas pour vous remercier et vous sachant humbles et discrets, je vous dis seulement : Merci pour tout.

– GLOSSAIRE –

ANOVA : Analyse de variance

PCSA : Surface de section transversale physiologique

CM : Centre de masse

CV : Coefficient de variation (%)

F0 : Force maximale théorique produite à vitesse nulle ($N.kg^{-1}$)

FMV : Force maximale volontaire (N ou $N.kg^{-1}$)

FSD : Muscle fléchisseurs superficiel des doigts

FPD : Muscle fléchisseurs profods des doigts

ICC : Coefficent de corrélation intraclasse

P : Puissance à poids de corps ($W.kg^{-1}$)

Pmax : Puissance maximale externe ($W.kg^{-1}$)

RFD : Taux de développement de le force "*rate of force development*" ($N.s^{-1}$)

Sfv : Pente de la relation force-vitesse ($N.s.m^{-1}.kg^{-1}$)

V0 : Vitesse maximale théorique produite à force nulle ($m.s^{-1}$)

– TABLE DES MATIERES –

INTRODUCTION GENERALE 15

I. La performance en escalade : une analyse plurifactorielle 15

II. Analyse des déterminants physiques de la performance en fonction des trois disciplines 16

III. Accession de l'escalade aux Jeux Olympiques 20

IV. Problématique et plan 21

PARTIE 1 : FORCE MAXIMALE ET TAUX DE DEVELOPPEMENT DE LA FORCE DES MUSCLES FLECHISSEURS DES DOIGTS CHEZ DES SPORTIFS DE HAUT NIVEAU EN ESCALADE 22

Chapitre I : Contraintes spécifiques à l'activité de l'escalade et indicateurs de la performance 23

I. Force maximale et RFD comme indicateurs de la performance dans les activités physiques et sportives 23

II. Contraintes spécifiques à l'activité de l'escalade et introduction des indicateurs de la performance : la force maximale et le RFD 26

II.1. Importance des membres supérieurs dans le maintien de la posture et dans le déplacement 26

II.2. Lien entre performance en escalade et force maximale des muscles fléchisseurs des doigts 29

II.3. Lien entre performance en escalade et taux de développement de la force des muscles fléchisseurs des doigts 30

II.4. Différence entre force maximale volontaire et RFD en fonction de la spécialité d'escalade 31

II.5. Entrainement de la force maximale volontaire et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts chez une population de grimpeurs de haut niveau 33

III. Facteurs influençant la production de force 36

III.1. Facteurs nerveux influençant la production de force 36

III.1.a. L'importance du recrutement et des décharges des unités motrices 36

III.1.b. Coordination inter musculaire et réduction de l'activation de l'antagoniste 38

III.2. Facteurs structuraux influençant la production de force 39

III.2.a. Descriptions des fibres 39

III.2.b. Différences au niveau des aspects architecturaux 41

IV. Approche méthodologique de l'analyse de la force maximale 43

IV.1. Outils de mesure pour l'analyse de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts 43
IV.2. Evolution de la force maximale en fonction du type de préhension 45
IV.3. Forces maximales absolues et normalisées des muscles fléchisseurs des doigts 48

V. Approche méthodologique de mesure du RFD 50
V.1. RFD tétanique et contractile 50
V.2. Description des outils de mesure 52
V.2.a. Importance du type de dynamomètre 52
V.2.b. Importance de la calibration du dynamomètre 53
V.2.c. Détermination du départ de la contraction 53
V.3. Contraintes des indications données aux sujets ainsi que le nombre d'essais 55
V.4. Variables mesurées 55

Chapitre II : Mise en place d'un test mesurant la force des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que le RFD et effet d'un entrainement spécifique sur une population de haut niveau 61

I. Protocole expérimental 62
I.1. Détails des outils de mesures 62
I.1.a. Dynamomètre 62
I.1.b. Balance à impédance 62
I.2. Présentation des groupes expérimentaux et de la procédure 63
I.2.a. Répartition des groupes et temporalité des études 63
I.2.b. Présentation et analyse des groupes 64
I.3. Détails de la procédure des expérimentations 65
I.3.a. Lieu de l'expérimentation 65
I.3.b. Posture et position des sujets 65
I.3.c. Choix des préhensions analysées 66
I.3.d. Présentation des essais 66
I.3.e. Présentation du plan d'entrainement 67
I.4. Méthodologie des paramètres analysés 68
I.4.a. Choix des paramètres analysés 68
I.4.b. Justification des paramètres analysés 69

II. Analyses statistiques 71

III. Résultats expérimentaux et interprétations 72
III.1. Résultats sur la base de facteurs anthropométriques 72
III.1.a. Résultats 72
III.1.b. Interprétation 72
III.2. Résultats sur la fiabilité et la reproductibilité de l'étude n°2 74
III.2.a. Résultats 74
III.2.b. Interprétation 75
III.3. Résultats sur la force maximale absolue et normalisée 78

III.3.a. Résultats ... 78
III.3.b. Discussion ... 79
III.4. Résultats sur le RFD ... 83
III.4.a. Influence des niveaux d'expertises sur le RFD ... 83
III.4.b. Evolution du RFD avant et après entrainement ... 86

IV. Comparaison entre les grimpeurs de haut niveau en bloc et en difficulté ... 93
IV.1. Protocole expérimental ... 93
IV.2. Analyse statistique ... 93
IV.3. Résultats ... 93
IV.4 Discussion et interprétation ... 95

V. Limites et perspectives ... 98
V.1. Limites ... 98
V.1.a. Limite liée au délai entre les mesures ... 98
V.1.b. Limite liée à la posture ... 98
V.2. Perspectives ... 99

VI. Conclusions et applications pratiques ... 101
VI.1. Conclusions ... 101
VI.2. Applications pratiques ... 102

PARTIE 2 : RELATION FORCE-VITESSE-PUISSANCE CHEZ LES GRIMPEURS DE HAUT NIVEAU, SIMILITUDES ET SPECIFICITES ... 103

Chapitre I : Présentation de la relation force-vitesse-puissance ... 104

I. Intérêt de la relation force-vitesse-puissance en escalade ... 104

II. Relation force-vitesse et puissance-vitesse ... 107
II.1. Interdépendance de la force et de la vitesse ... 107
II.2. Relation au niveau du muscle isolé ... 107
II.3. Relation force-vitesse au niveau d'un mouvement mono-articulaire ... 109
II.4. Relation force-vitesse au niveau des mouvements poly-articulaires ... 110
II.5. Facteurs analysés par la relation force-vitesse-puissance ... 111

III. Evaluation des capacités mécaniques ... 116
III.1. Evaluation des capacités mécaniques par des méthodes de terrain ... 116
III.2. Estimation indirecte de la puissance maximale ... 117
III.3. Modèle biomécanique étudiant la relation force-vitesse-puissance ... 119

IV. Analyse de la relation force-vitesse-puissance par des outils méthodologiques ... 123
IV.1. Utilisation de la plateforme de force ... 123

IV.2. Utilisation d'outils embarqués 123
IV.3. Fiabilité des outils embarqués 124
IV.4. Utilisation de ces outils méthodologiques en escalade 125

V. Méthodologie pour la mesure et l'analyse de la relation force-vitesse-puissance 127
V.1. Analyse des membres inférieurs et supérieurs 127
V.2. Mouvement balistique *versus* mouvement non balistique 127
V.3. Paramètres mesurés 128
V.4. Choix au niveau des charges additionnelles : relation avec le 1-RM 129

VI. Choix méthodologiques dans l'analyse de la relation force-vitesse-puissance en escalade 132

Chapitre II : Etude de la relation force-vitesse-puissance chez des grimpeurs de haut niveau en bloc, difficulté et vitesse 133

I. Méthode expérimentale 133
I.1. Présentation des participants 133
I.2. Procédure de la démarche expérimentale 134
I.2.a. Echauffement 134
I.2.b. Procédure expérimentale 134
I.3. Méthodologie 135

II. Analyses statistiques 137

III. Résultats 138
III.1. Résultats sur les données anthropométriques 138
III.2. Résultats sur la relation force-vitesse-puissance 138

IV. Discussion 142
IV.1. Fiabilité du test 142
IV.2. Interprétations de Pmax et de V0 142
IV.3. Interprétation de F0 143
IV.4. Interprétation de Sfv 143
IV.5. Rapport entre Pmax et P 144

V. Limites de l'étude 146

VI. Application pratique et conclusion 148
VI.1. Application pratique 148
VI.2. Conclusion 148

CONCLUSION GENERALE 149

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 157

ANNEXE 1 : COTATIONS EN ESCALADE 173

ANNEXE 2 : 1ER ARTICLE PUBLIE, 2017 175

ANNEXE 3 : 2ND ARTICLE PUBLIE, 2019 187

ANNEXE 4 : ARTICLE ACCEPTE, 2019 201

Ce travail de thèse à fait l'objet des publications suivantes :

Articles publiés dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture :

Levernier, G. and G. Laffaye. 2017. Four Weeks of Finger Grip Training Increases the Rate of Force Development and the Maximal Force in Elite and Top World-Ranking Climbers. "*Journal of Strength and Conditioning Research"* 33 (9) : 2471-2480.

Levernier, G. and G. Laffaye. 2019. Rate of Force Development and Maximal Force : Reliability and Difference between Non-Climbers , Skilled and International Climbers. "*Sports Biomechanics"* 1–12.

Article accepté dans une revue scientifique internationale à comité de lecture :

Levernier, G., P. Samozino, G. Laffaye 2019 Force-Velocity-Power profile in high elite boulder, lead, speed climbers competitors. "*International Journal of Sports Physiology and Performance*".

Communications dans des congrès internationaux :

Levernier Guillaume et Guillaume Laffaye. The rate of force development : a new biomechanical key factor in climbing. *4th International Rock Climbing Research congress- Chamonix 2018.*

Levernier Guillaume, Pierre Samozino et Guillaume Laffaye : Etude du profil force-vitesse chez des sportifs de haut-niveau en escalade. *18ème congrès International ACAPS Paris 2019.*

INTRODUCTION GENERALE

I. La performance en escalade : une analyse plurifactorielle

Selon la Fédération Française de la montagne et de l'escalade (FFME), l'escalade repose sur la capacité à se « déplacer le long d'un support plus ou moins vertical, qui peut aller du relief naturel, à la structure artificielle » avec comme objectif « d'atteindre le sommet de voies ou de blocs, en évoluant à mains nues et sans aide matérielle».

En d'autres termes, les grimpeurs doivent saisir des prises avec leurs mains et se déplacer sur un support (mur vertical, dalle, dévers, surplomb, etc…) en posant également leurs pieds.

Une étude de 2001 énonce que l'escalade est une activité physique dans laquelle les membres supérieurs jouent un rôle déterminant dans le maintien de l'équilibre et que lorsqu'un membre n'est plus en contact avec la paroi, les forces d'appui doivent être spécifiquement réparties (Noe, Quaine, et Martin, 2001). Les membres supérieurs ont donc un rôle déterminant dans la conservation de la posture. De plus, les contraintes mécaniques évoluent en fonction du nombre d'appui sur la paroi ; la force externe produite par les membres supérieurs doit donc également évoluer durant l'ascension de la voie.

Billat (2012) définit la performance d'une action comme étant l'optimisation du rapport entre les capacités physiques d'une personne et une tâche sportive à accomplir, quel que soit le niveau de réalisation. Par conséquent, la performance en escalade se caractériserait par l'optimisation de l'enchainement de mouvements, résultant d'une production de force la plus adaptée pour répondre aux contraintes demandées par l'activité sportive. Aussi, les aspects biomécaniques de l'effort sont cruciaux dans l'analyse de la performance. Des études portant sur différentes activités sportives par exemple dans l'activité du basket-ball (Teramoto et al., 2018) - ont montré que des facteurs liés à des qualités physiques comme la puissance ainsi que la production de force externe des membres supérieurs sont déterminants dans la performance du sportif. Ces qualités physiques découlent d'actions biomécaniques et de processus physiologiques. En 2013, une étude montre que la performance en escalade est

multifactorielle (n = 43 facteurs) (Magiera et al., 2013). Selon les auteurs, les facteurs identifiés peuvent être regroupés en sept grandes catégories à savoir 1/ des facteurs anthropométriques (e.g., masse, tailles, pourcentage de matière grasses), 2/ des caractéristiques somatiques (*i.e.* relatifs au contrôle volontaire du mouvement du corps, perception des stimuli externes), 3/ des propriétés de souplesse, 4/ des qualités physiques (*e.g.*, force maximale et endurance des muscles des doigts et des bras, puissance des membres supérieurs), 5/ des caractéristiques techniques, 6/ des facteurs tactiques propres à l'activité en escalade et enfin 7/ des ressources mentales investies. Toujours selon Magiera et al. (2013), 96% de la variance de la performance s'explique à 38% par des facteurs physiques et anthropométriques, 33% par des facteurs techniques et tactiques et à 25% par des ressources mentales.

Parmi les facteurs physiques déterminants dans la performance en escalade, il existerait des différences chez des sportifs élites (Laffaye, Levernier et Collin, 2016). Ces différences de qualités physiques s'expliqueraient par la spécialité pratiquée en escalade. En effet, au sein de la FFME, il existe trois types de pratiques *i.e.* : pratique de la difficulté, de la discipline du bloc et de la discipline de la vitesse. En conséquence, pour comprendre la performance en escalade il apparaît nécessaire d'étudier les qualités physiques recrutées pour chacune des pratiques d'escalade.

II. Analyse des déterminants physiques de la performance en fonction des trois disciplines

Dans la pratique de la difficulté, le grimpeur évolue sur une structure comprise entre 7 et 20 mètres (cf. figure 1). Le grimpeur ne peut utiliser que les prises d'escalade qui lui sont proposées et assure sa sécurité grâce à l'utilisation d'une corde, de dégaines et d'un baudrier. Cette corde est reliée à un autre grimpeur appelé l'assureur qui gère la sécurité grâce à un système d'assurage. La pratique de l'escalade de difficulté est composée à 36,3 ± 9% de phase mobile et à 63,0 ± 9,4% de phase immobile (Billat et al., 1995). L'escalade de difficulté est donc une discipline intermittente dans laquelle les contraintes mécaniques au niveau des membres supérieurs sont importantes et particulièrement sur les muscles fléchisseurs des doigts (Watts, 2004). En effet, les grimpeurs élites de cette discipline sont en mesure de développer une force plus importante au niveau des doigts (321 ± 18 N) que des grimpeurs

novices (251 ± 14 N) (Grant et al., 2001). De plus l'endurance de force des bras apparaît également comme un facteur déterminant dans la performance (*e.g.*, 33,17 ± 7,25 tractions chez les grimpeurs élites vs. 25,75 ± 5,42 chez les grimpeurs confirmés) [(Grant et al., 1996) ; (Ozimek et al., 2017)].



Figure 1 : Illustration de la discipline de difficulté
(Romain Desgranges ; demi-finale de coupe du monde de difficulté ; Chamonix 2018).
Crédit photo : Rémy Fabregue

Quant au grimpeur de bloc, il évolue sur une structure ne dépassant pas 4.50 mètres de hauteur au-dessus de la surface de réception (cf. figure 2). Le nombre de mouvements proposé est généralement compris entre 2 et 12. Le grimpeur n'utilise pas de corde ni de dégaines et sa sécurité est assurée par des tapis de réception.

La force maximale des muscles fléchisseurs des doigts est également déterminante dans la performance. Il a été montré que des grimpeurs de bloc finalistes en coupe du monde produisent une force maximale environ deux fois supérieure à celle des grimpeurs novices de la même discipline (477,7 ± 89,3 N pour les finalistes (Watts, Martin, et Durtschi, 1993) contre 251 ± 14 N pour les novices (Grant et al., 2001)). De plus, lors d'une épreuve nationale de bloc, la part des moments dynamiques (22,3 ± 2,1 secondes) est plus importante que les moments statiques (7,5 ± 1,6 secondes) (White et Olsen, 2010). Le temps dont dispose le grimpeur pour développer une force importante apparaît donc limité. Cette capacité à développer de la force rapidement peut être analysée par un paramètre biomécanique appelé le taux de développement de la force ou « rate of force development » (RFD). Maffiuletti et al.

(2016) définissent ce terme comme étant « la capacité à produire une force […] le plus rapidement possible au cours d'une contraction volontaire rapide réalisée en partant d'une position de repos » (Maffiuletti et al., 2016). Fanchini et al. (2013) montrent par ailleurs que les grimpeurs de bloc ont un RFD plus élevé que les grimpeurs de difficulté lors d'une contraction maximale des muscles fléchisseurs des doigts (Fanchini et al., 2013). De plus, étant donné le nombre important de mouvements dynamiques, la force produite doit être réalisée avec une vitesse importante. Laffaye et al. (2014) montrent que les grimpeurs élites en bloc présentent une puissance plus importante que les novices (Laffaye et al., 2014). Cette notion de puissance, définie comme le produit de la force par la vitesse, peut être corrélée à la performance sportive (Cronin et Sleivert, 2005).

En résumé, trois indicateurs sont importants pour décrire la performance en bloc : la force maximale, le RFD des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que la puissance développée par les membres supérieurs.



Figure 2 : Illustration de la discipline de bloc
(Manuel Cornu ; finale de coupe du monde de bloc ; Chongqing 2019).
Crédit photo : FFME

Enfin, pour la pratique de la vitesse (cf. figure 3), le grimpeur réalise un itinéraire de 15 mètres de haut, avec un dévers de 5 degrés le plus rapidement possible. Les grimpeurs sont assurés en moulinette grâce à des enrouleurs garantissant leur sécurité. La voie n'évolue pas

dans le temps, permettant ainsi d'établir des records officiels. Chez les hommes, le record du monde est détenu par l'iranien Reza Alipour Shenazandifard avec un chronomètre de 5,48 secondes. Chez les femmes, c'est la chinoise YiLing Song qui détient le record du monde avec un temps de 7,10 secondes. Cette discipline, plus récente (mur officiel apparu en 2007) que les deux présentées précédemment, a été peu étudiée dans la littérature. Néanmoins, une étude montre que les grimpeurs de vitesse présentent une circonférence de la cuisse supérieure aux grimpeurs de difficulté (52,0 ± 3,1 cm contre 48,0 ± 2,7 cm) (Ryepko, 2013b). Ces résultats sont appuyés par une autre étude montrant que les grimpeurs de vitesse sont en mesure d'atteindre une hauteur plus importante sur un test de saut mobilisant les membres inférieurs (grimpeurs de vitesse : 53,0 ± 2,94 cm *versus* grimpeurs de difficulté : 48,0 ± 1,76 cm) (Ryepko, 2013a). Il semble donc que la performance en vitesse s'explique par la force développée par les membres inférieurs. Les membres supérieurs (fléchisseurs des doigts et biceps brachial) ont également leur importance, comme le montre une récente étude (Guo et al., 2019).



Figure 3 : Illustration de la discipline de vitesse
(Bassa Mawem ; coupe du monde de vitesse)
Crédit photo : Sasha Onil.

Les pratiques d'escalade de bloc et de difficulté en compétition présentent des similarités que l'on ne retrouve pas en vitesse. Les voies et blocs sont réalisés « flash » (le grimpeur connaît les méthodes mais n'a jamais essayé auparavant) ou « à vue » (le grimpeur part sans aucune indication). Par conséquent, le grimpeur doit être en mesure de s'adapter en fonction de la situation, en utilisant ses propres capacités. Le temps mis pour faire le parcours n'a que peu d'importance dans le cas présent.

De plus, afin d'estimer la difficulté de la voie ou du bloc, différentes échelles de cotations sont proposées (*Annexe 1*). À la suite d'un congrès international en escalade, une échelle de cotations proposée par l'International Rock Climbing Research association (IRCRA) permet de mieux catégoriser le niveau des sportifs (Draper et al., 2015). Actuellement, il est supposé que des grimpeurs de haut niveau ont un niveau 8b pour les hommes et 8a+ pour les femmes, cotation *Fb* sur une échelle allant de 3 (novice) à 8c+ (haut niveau) (*Annexe 1*).

III. Accession de l'escalade aux Jeux Olympiques

Pour les Jeux Olympiques (JO) en 2020 à Tokyo, l'escalade sera une discipline olympique sous la forme d'un combiné des trois disciplines *i.e.*, difficulté, bloc et vitesse (Batuev et Robinson, 2019). Le score d'un athlète sera déterminé en calculant le produit de ses classements dans chacune des disciplines. Par exemple, un grimpeur qui aura fait premier bloc, deuxième en difficulté et troisième en vitesse aura un score de 6 ($1 \times 2 \times 3 = 6$). Le grimpeur qui obtiendra le plus petit score sera champion olympique.

Aussi, le futur champion olympique de l'épreuve du combiné en escalade ne devra pas être performant que dans une seule « tâche sportive à accomplir » (Billat, 2012) mais dans trois tâches. Il apparaît donc que le grimpeur devra être à la fois, performant dans une discipline et polyvalent dans les autres, pour gagner. Par conséquent, dans le cadre de cette préparation olympique, il est nécessaire de caractériser les aptitudes physiques spécifiques à chaque discipline de l'escalade en vue d'optimiser la préparation des grimpeurs.

IV. Problématique et plan

Si de nombreux travaux ont porté sur la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts, le RFD n'a été analysé que dans une seule étude (Fanchini et al., 2013), dont on montrera que les résultats peuvent être discutés. De plus, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de ce paramètre à la suite d'un entrainement spécifique en escalade.

A notre connaissance, les études existantes se sont limitées à la comparaison entre deux disciplines (bloc et difficulté, ou difficulté et vitesse). Or, dans le cadre d'un combiné olympique et dans le souci d'optimisation de la performance, il est nécessaire de mener une étude comparant ces trois disciplines. C'est dans ce contexte que ce travail de thèse s'inscrit.

Ce projet doctoral s'intéresse donc aux facteurs biomécaniques responsables de la performance sportive en escalade. Les populations analysées sont à la fois des non grimpeurs, des sportifs confirmés mais également des grimpeurs de niveau international. Analyser des groupes de différents niveaux permet de comparer les adaptations spécifiques en fonction du niveau d'expertise. De plus, si l'objectif est de décrire la performance sportive, il est nécessaire de s'intéresser spécifiquement à une population de sportifs de haut niveau.

Etant donné que l'escalade se décline en trois disciplines possédant chacune ses spécificités, il est pertinent d'étudier les différences ainsi que les similitudes.

Ce travail de thèse sur articles se déclinera en plusieurs parties.

Il s'agit dans un premier temps de montrer que la force maximale et le RFD sont des indicateurs de la performance dans les activités physiques et sportives. Puis, après avoir décrit précisément les contraintes liées à l'activité de l'escalade, il s'agira de montrer que la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que le RFD sont déterminants dans la performance. Une première étude étudiera la fiabilité et la reproductibilité d'un test de mesure tout en comparant ces deux paramètres en fonction du niveau d'expertise. De plus, une seconde étude montrera que le RFD est sensible à l'entrainement.

Le second chapitre aura pour objectif de comparer les disciplines de l'escalade (bloc, difficulté, vitesse) sur la production de force externe des membres supérieurs à différentes vitesses. Après avoir présenté la relation force-vitesse-puissance, celle-ci sera utilisée sur le mouvement de la traction, caractéristique de la pratique en escalade.

PARTIE 1

FORCE MAXIMALE ET TAUX DE DEVELOPPEMENT DE LA FORCE DES MUSCLES FLECHISSEURS DES DOIGTS CHEZ DES SPORTIFS DE HAUT NIVEAU EN ESCALADE

Chapitre I : Contraintes spécifiques à l'activité de l'escalade et indicateurs de la performance

L'objectif de ce chapitre est de montrer que la force maximale volontaire et le taux de développement de la force (RFD) sont des indicateurs de performance dans les activités physiques et sportives. Par conséquent, si nous voulons analyser et décrire les caractéristiques propres au sportif de haut niveau, il semble nécessaire de s'intéresser à ces facteurs. Il s'agira ensuite de montrer qu'ils sont déterminants dans la performance en escalade. Enfin, après avoir présenté les facteurs influençant la production de force, nous présenterons les exigences méthodologiques de ces deux mesures dans l'activité de l'escalade.

I. Force maximale et RFD comme indicateurs de la performance dans les activités physiques et sportives

Le mouvement est fondamental dans la locomotion chez l'humain et donc plus précisément dans l'ensemble des activités sportives. D'ailleurs, la capacité à se déplacer le plus rapidement possible est la clef dans certaines disciplines comme par exemple le sprint au 100 mètres. Ce déplacement est contraint par des lois de la mécanique du mouvement. Ces dernières ont été mises en avant par Isaac Newton en 1687 dans son ouvrage « *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. » (Newton, 1687). Un nombre de trois lois régissent la variation du mouvement humain qu'il convient de rappeler.

- Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et le contraigne à changer d'état.
- Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice ; et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.
- L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires.

Ces trois lois posent le constat que le mouvement n'est rendu possible qu'en raison d'une production de force du sportif. Le déplacement n'est alors qu'une conséquence de cette force externe, que le sportif applique sur son environnement. Par conséquent, si notre travail a

pour vocation de s'intéresser à la performance dans le sport, il apparaît nécessaire d'analyser spécifiquement cette production de force externe.

Vouloir quantifier cette force externe implique de mesurer les capacités maximales qu'un groupe de muscles est capable de produire lors d'un mouvement spécifique, par exemple lors d'un test d'isométrie[1] maximale ou lors d'une répétition concentrique (1-RM). Les informations fournies par cette quantification de force externe produite apportent des réponses quant à la performance. Par exemple, une étude de 2004 explique que la force maximale produite par des footballeurs élites sur un test de demi squat est significativement corrélée à la performance lors d'un sprint de 10 et 30 mètres (r = 0,94 et 0,71 respectivement) (Wisløff et al., 2004). Plus le sportif développe une force maximale importante sur un test de demi squat, plus il sera capable de produire une force importante à vitesse lente. En s'intéressant maintenant aux membres supérieurs, une étude de 2007 montre que la vitesse maximale d'un tir au hand-ball est significativement corrélée au 1-RM lors d'un test de développé couché chez des sportifs élites (r = 0,64) (Marques et al., 2007).

Les résultats nous montrent bien la relation entre la force maximale mesurée lors de tests et la production de force externe lors d'un geste sportif. De plus, ces deux études font émerger un même indicateur, à savoir la force maximale. Duchateau et al. (2001) définissent cette notion comme étant la force qu'un muscle ou un groupe de muscles peut générer lors d'une contraction ou d'un mouvement musculaire spécifique. Cette force maximale volontaire (FMV) est également surnommée MVC du terme anglais *maximal voluntary contraction*. Par conséquent, si nous voulons caractériser la performance d'une discipline, il est crucial de s'intéresser à la force maximale produite par le groupe de muscles concernés.

En outre, Tillin et al. (2013) expliquent que la performance chez des sportifs élites en rugby n'est pas seulement corrélée à la force maximale volontaire mais également à la force explosive. De fait, un autre paramètre apparaît comme étant lié à la performance sportive. Cette notion de force explosive se caractérise par la capacité à produire de la force durant le début de la phase initiale de la contraction musculaire (Tillin et al., 2013a). Ce paramètre est également appelé le taux de développement de la force ou *rate of force development* (RFD).

[1] Pour rappel, une contraction « isométrique » se caractérise par une production de force des muscles avec une absence de mouvement.

Cet indicateur est beaucoup analysé dans de nombreuses disciplines, comme par exemple le saut (Luhtanen et Komi, 1979), où la durée durant laquelle l'athlète peut réaliser une contraction musculaire est inférieure au temps nécessaire pour développer sa force maximale. Une illustration présente la différence entre la FMV et le RFD (cf. figure 4).

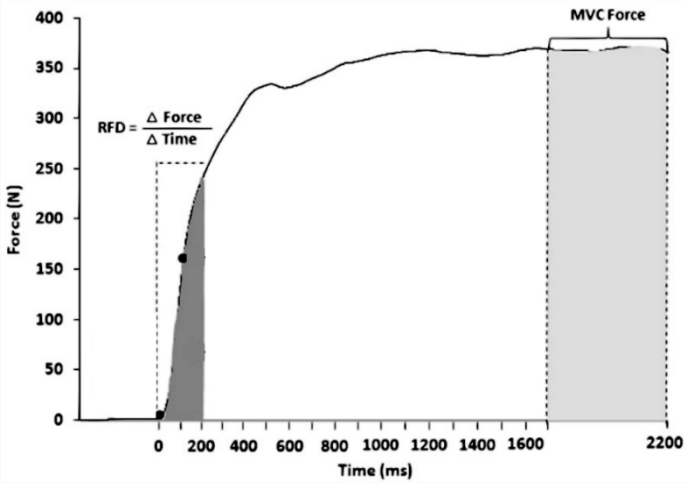


Figure 4 : Différence entre le taux de développement de la force (RFD) et la MVC (FMV). (Thompson et al., 2012)

Il apparaît donc que la performance dans les activités physiques et sportives s'explique à travers la force maximale ainsi que le RFD qui sont deux indicateurs de la production de force externe.

– Résumé –

Le déplacement d'un sportif n'est possible uniquement parce que ce dernier produit une force externe, le faisant alors passer d'un état statique à un état mobile. Par conséquent, si l'objectif est de s'intéresser à la performance, il est nécessaire d'analyser spécifiquement la production de forces externes des membres concernés.

La quantification des capacités maximales que produit un groupe de muscles passe par des mesures sur de tests spécifiques (1-RM, test isométrique maximal) faisant émerger deux indicateurs : la force maximale volontaire (FMV) et le RFD. Dans le cadre d'un travail sur la compréhension de la performance dans une discipline sportive, il est donc primordial d'analyser ces deux paramètres.

II. Contraintes spécifiques à l'activité de l'escalade et introduction des indicateurs de la performance : la force maximale et le RFD

Cette première partie a pour objectif de montrer que les contraintes mécaniques en escalade des membres supérieurs et principalement les muscles fléchisseurs des doigts sont importantes. Deux indicateurs apparaissent comme étant discriminants du niveau d'expertise : la force maximale et le RFD.

II.1. Importance des membres supérieurs dans le maintien de la posture et dans le déplacement

L'escalade implique de déplacer sa propre masse corporelle sur une paroi verticale ou déversante en luttant contre la force de gravité. Afin de ne pas tomber, le grimpeur doit produire une force avec ses mains et ses pieds sur des prises d'escalade. La réussite d'un passage réside donc sur le principe de soumettre une force nécessaire opposée à la gravité.

Une étude de 1995 a discuté de l'alternance des phases mobiles et immobiles qui caractérise l'escalade (Billat et al., 1995). Ces travaux ont été complétés en 2001 par une analyse des deux types de phases (Noe et al., 2001). Les auteurs se sont intéressés à la variation des forces exercées par les mains et les pieds du grimpeur sur les prises d'escalade en fonction de l'inclinaison de la paroi lorsqu'il est en phase immobile (cf. figure 5). Ils ont ainsi montré que la force exercée est plus importante au niveau des pieds sur un mur vertical (194 ± 59 N pour le pied droit et 201 ± 49 N pour le pied gauche) que sur une paroi déversante (128 ± 37 N pour le pied droit et 133 ± 37 N pour le pied gauche). A l'inverse, la force exercée au niveau des mains est plus faible sur un mur vertical (144 ± 39 N pour la main droite et 151 ± 47 N pour la main gauche) que sur une paroi déversante (218 ± 27 N pour la main droite et 214 ± 33 N pour la main gauche).

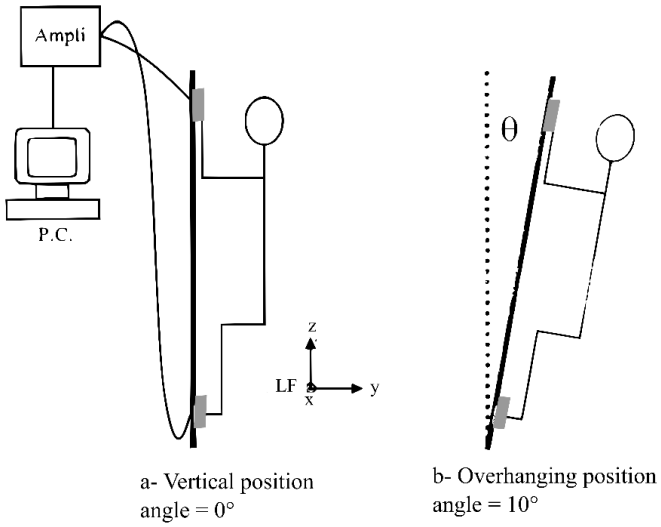


Figure 5 : Présentation des positions verticales (a) et en dévers (b)

(Noe et al., 2001)

En phase mobile, le grimpeur doit temporairement lâcher une main et/ou retirer un pied se retrouvant alors avec uniquement trois appuis en contact avec la paroi. Il doit donc répartir les forces qu'il exerce sur ces appuis et on comprend aisément que cette répartition n'est pas équilibrée s'il veut pouvoir conserver sa position. Les auteurs de l'étude de 2001 ont montré l'évolution des forces exercées par le grimpeur sur chacun de ses appuis selon qu'il est en position quadrupédique (4 points d'appui, phase immobile) ou tripédique (3 points d'appui, phase mobile) (cf. tableau 1). Ces résultats montrent que lorsque le grimpeur retire un pied, il doit augmenter la force qu'il exerce au niveau de la main opposée s'il veut rester stable.

Quadrupedal state (t_q)				Tripedal state (t_s)			
RH	LH	RF	LF	RH	LH	RF	LF
Vertical position							
144 ± 39	151 ± 47	194 ± 59	201 ± 49	83 ± 31^{c}	266 ± 46^{c}	0	331 ± 73
Overhanging position							
218 ± 27^{b}	214 ± 33^{b}	128 ± 37^{b}	133 ± 37^{b}	$180 \pm 31^{b,c}$	288 ± 32^{c}	0	145 ± 20

[a] RH, right hand; LH, left hand; RF, right foot; LF, left foot.
[b] Significant difference between both positions.
[c] Significant difference between t_q and t_s ($P<0.05$).

Tableau 1 : Force appliquée sur la prise en position verticale et en dévers

(Noe et al., 2001)

Ces 2 articles permettent donc d'affirmer que l'escalade est une activité où la force produite au niveau des mains joue un rôle fondamental. En effet, étant plus sollicitées que les pieds

lorsque le grimpeur est en phase immobile et en dévers, le différentiel augmente avec l'angle du dévers. Enfin, les mains doivent encore assurer une force supplémentaire très importante lorsque le grimpeur retire son pied.

Lors de la saisie d'une prise d'escalade, de nombreux muscles agissent de concert, soit dans la réalisation du mouvement, soit dans la stabilisation des différentes articulations. Ainsi, le fléchisseur ulnaire et radial du carpe ainsi que le long palmaire n'interviennent pas dans la flexion des doigts mais jouent un rôle dans la stabilisation du poignet. De même, des muscles intrinsèques de la main, tels que les lombricaux et les interosseux, participent à la stabilisation des métacarpo-phalangiennes, permettant certains mouvements spécifiques comme la flexion de l'articulation métacarpo-phalangienne ainsi que l'abduction des doigts (cf. figure 6).

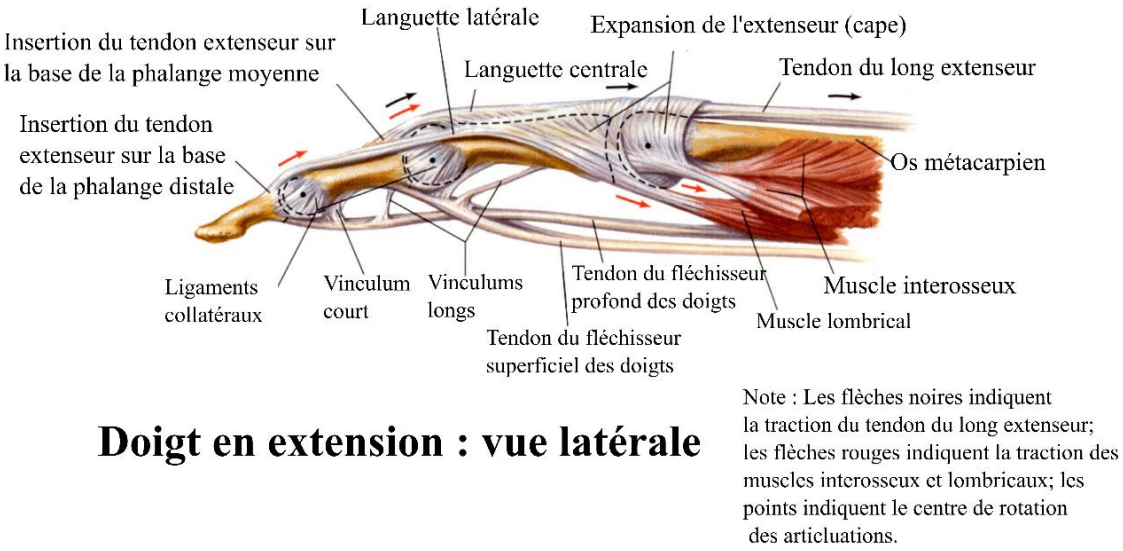


Figure 6 : Illustration des tendons et muscles des doigts
(figure tirée de l'Atlas Anatomie Humaine Netter)

Le présent travail de recherche se focalise sur les muscles ayant pour fonction la flexion des doigts et permettant de produire de la force sur les prises d'escalade. Il s'agit du muscle fléchisseur superficiel des doigts (FSD) et du muscle fléchisseur profond des doigts (FPD).

Le muscle fléchisseur superficiel des doigts prend son origine au niveau de l'épicondyle médial de l'humérus par un tendon commun. Son corps charnu se situe dans la zone antérieure de l'avant-bras. Il passe à l'intérieur du canal carpien par des tendons qui se terminent sur les bords latéraux des phalanges intermédiaires des doigts 2 à 5.

Le muscle fléchisseur profond des doigts prend son origine sur l'ulna, de la membrane inter osseuse, du fascia antébrachial et de la partie supérieure du bord interosseux du radius. Passant également par le canal carpien, il se divise en 4 tendons se terminant sur les phalanges distales des doigts 2 à 5.

Comme tous les muscles squelettiques, les fléchisseurs des doigts peuvent produire une force sans entrainer nécessairement un mouvement de l'articulation concernée. On parle dans ce cas de « contraction » isométrique des doigts. C'est à ce régime de contraction de musculaire que nous nous intéressons ici.

II.2. Lien entre performance en escalade et force maximale des muscles fléchisseurs des doigts

Les muscles fléchisseurs profonds et superficiels des doigts sont responsables de la flexion des doigts. Au regard des contraintes mécaniques des membres supérieurs précédemment discutées, ils sont donc cruciaux dans la performance en escalade. Pour conserver son équilibre, en phase immobile comme en phase mobile, le grimpeur doit produire une force importante par l'intermédiaire de ses muscles fléchisseurs des doigts et, plus les contraintes mécaniques augmentent, plus la force développée est élevée. Un indicateur permettant d'évaluer la tension que peut produire un sportif avec un groupe musculaire est la force maximale volontaire. Cette force peut être enregistrée lors d'un exercice isométrique contre la résistance d'un capteur de force.

De nombreuses études montrent que cette force maximale volontaire est discriminante du niveau des grimpeurs. Par exemple, Vigouroux et Quaine (2006) ont réalisé des mesures de la force maximale lors d'un mouvement volontaire de flexion de doigts sur un dynamomètre entre des sportifs spécialisés en escalade et d'autres sportifs. Les résultats montrent que la force développée par les grimpeurs est bien supérieure par rapport aux non grimpeurs (412,3 ± 40,9 N contre 361,6 ± 52,1 N). Des résultats similaires sont retrouvés dans d'autres études (Laffaye et al., 2016). Une étude de 2018 a confirmé qu'il y a bien une relation entre la force maximale volontaire développée par les muscles fléchisseurs des doigts et le niveau de performance en escalade ($r^2 = 0,66$) (Michailov et al., 2018).

Le présent travail s'intéressant aux facteurs de la performance en escalade chez des sportifs de haut niveau, il est donc indispensable d'analyser la force maximale.

II.3. Lien entre performance en escalade et taux de développement de la force des muscles fléchisseurs des doigts

Lors des phases mobiles (Billat et al., 1995), deux catégories de mouvements impliquant des coordinations motrices différentes peuvent être citées. Il existe tout d'abord les mouvements statiques. White et Olsen (2010) les définissent en tant qu'un déplacement avec « une absence de mouvement de la ceinture pelvienne ». Ces mouvements sont caractérisés par une production de force importante des membres supérieurs à vitesse lente. Il existe également des mouvements dynamiques qui, à l'inverse sollicitent les membres inférieurs et supérieurs. L'amplitude du mouvement est plus ample. L'ensemble des segments articulaires se synchronise, engendrant une vitesse plus importante.

Depuis quelques années, l'escalade a beaucoup évolué. Elle continue bien-sûr à se composer d'une alternance entre des mouvements mobiles et immobiles, mais la proportion des « mouvements dynamiques » est devenue aujourd'hui majoritaire en compétition (White et Olsen, 2010), notamment dans la discipline du bloc. Etant donné que la vitesse de déplacement durant un mouvement est plus importante, le grimpeur arrive vite sur les prises d'escalade. Il doit alors développer de la force le plus rapidement possible pour ne pas tomber. Ainsi, même s'il reste très important pour le sportif de développer une force maximale afin d'être en mesure d'assurer chaque point d'appui, le temps qu'il met pour la produire devient également très important. Ce temps est directement lié au taux de développement de la force (RFD).

Une étude de 2013 s'est intéressée à la différence du RFD "contractile" (il s'agit d'un RFD calculé lors d'une contraction volontaire et non tétanique) lors d'une contraction maximale des muscles fléchisseurs des doigts entre des grimpeurs de bloc, des grimpeurs de difficulté et des non grimpeurs (Fanchini et al., 2013). Dans cette étude, les grimpeurs sont assis sur une chaise avec le bras complètement tendu. Ils réalisent une flexion de doigts le plus rapidement et le plus fort possible sur un capteur de force à jauge de contraintes (SBB, Tempo technologies, Taipei, Taiwan). Les auteurs s'intéressent ici au pic du RFD, c'est-à-dire à la variation la plus importante durant la pente d'installation de la force. Les résultats montrent que le RFD est significativement plus faible dans le dernier groupe, dans le cas présent chez des non-grimpeurs (cf. figure 7).

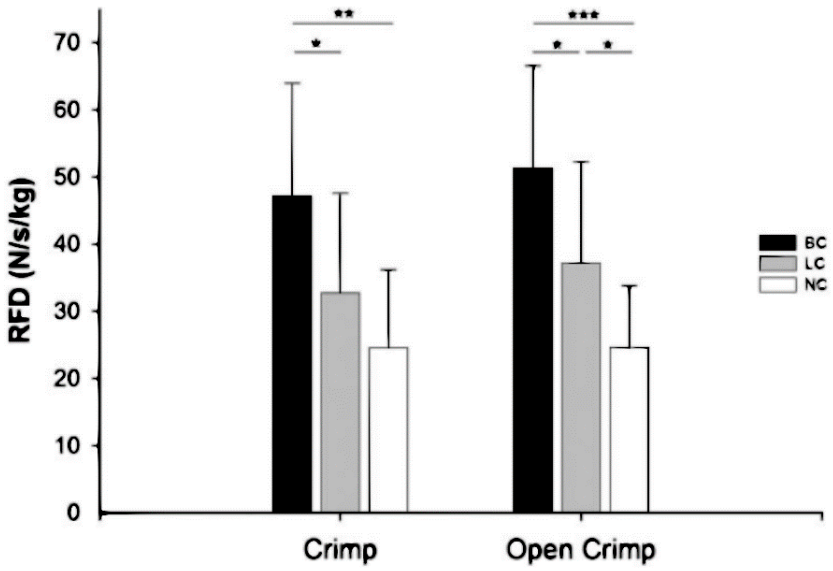


Figure 7 : Taux de développement de la force des muscles fléchisseurs des doigts
BC : grimpeurs de bloc ; LC : grimpeurs de difficulté ; NC : non grimpeurs
* p<0,05 ; ** p<0,01 ; *** p<0,001
(Fanchini et al., 2013)

Ce résultat démontre l'intérêt d'étudier le RFD comme indicateur de la performance en escalade. Il doit donc être analysé dans le cadre d'un travail de recherche portant sur une population de haut niveau en escalade.

II.4. Différence entre force maximale volontaire et RFD en fonction de la spécialité d'escalade

Ce travail s'intéresse également aux spécificités entre les différentes disciplines d'escalade. Il est donc nécessaire de s'intéresser à ce qui les différencie du point de vue de la force maximale (des muscles fléchisseurs des doigts) et du RFD[2].

Fanchini et al. (2013) ont montré que les grimpeurs élites de bloc sont en mesure de produire un RFD et une force maximale volontaire plus important que les grimpeurs de difficulté (cf. figure 8). .

[2] Dans la suite de ce travail, notamment lors de la présentation des études, nous traiterons du RFD contractile ; c'est-à-dire résultant d'une contraction volontaire et non tétanique.

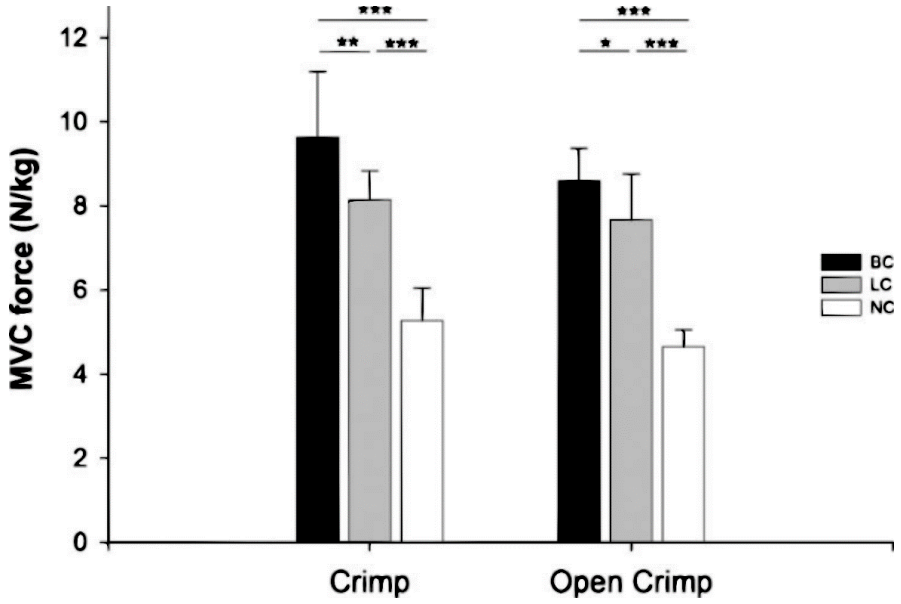


Figure 8 : Force maximale des muscles fléchisseurs des doigts

BC : grimpeurs de bloc ; LC : grimpeurs de difficulté ; NC : non grimpeurs

* p<0,05 ; ** p<0,01 ; *** p<0,001

(Fanchini et al., 2013)

C'est la seule étude comparative sur le sujet et aucune n'a comparé des groupes de grimpeurs participant à des compétitions internationales. A ce jour, les seules publications disponibles ne s'intéressent qu'à un groupe donné. L'idée est donc d'utiliser ces résultats pour réaliser une étude comparative rétrospective. On peut notamment citer :

- Une étude de 2009 (Michailov, Mladenov et Schöffl, 2009) qui a mesuré une moyenne des forces maximales volontaire de 574,87 ± 111,83 N lors d'un test de flexion de doigts chez des grimpeurs participants à des compétitions internationales en bloc.
- Une étude de 1993 (Watts, Martin et Durtschi, 1993) qui a mesuré des valeurs de 477,75 ± 89,27 N chez des grimpeurs internationaux en difficulté.

Cependant, vouloir comparer ces 2 valeurs et conclure ainsi que la force maximale est plus élevée chez les grimpeurs de bloc, manquerait de rigueur scientifique. En effet, des différences au niveau de la temporalité de ces études mais également au niveau du protocole de mesures rendent hasardeuses une telle comparaison. En conclusion, il n'existe à ce jour aucun résultat permettant d'évaluer la différence du point de vue de la force maximale entre les grimpeurs de bloc et les grimpeurs de difficulté de niveau international.

Le même constat peut être fait concernant le RFD que l'on peut qualifier de contractile. Fanchini et al. (2013) ont montré qu'il est significativement plus élevé pour les

grimpeurs de bloc par rapport aux grimpeurs de difficulté (cf. figure 7), mais aucune étude n'a réalisé une telle comparaison pour des grimpeurs participant à des compétitions internationales.

II.5. Entrainement de la force maximale volontaire et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts chez une population de grimpeurs de haut niveau

Les effets sur la force maximale d'un entrainement spécifique n'ont été que très peu étudiés en escalade. Quelques études [(Medernach, Kleinöder, et Lötzerich, 2015) ; (Saeterbakken et al., 2018)] ont bien montré qu'un entrainement adapté engendrait une amélioration de la force maximale volontaire des muscles fléchisseurs des doigts, mais elles ne se sont intéressées qu'à des grimpeurs dont le niveau n'était compris qu'entre 7a et 7c *(cf. Annexe 1)*. Par conséquent, elles ne répondent pas à la problématique de cette thèse qui s'intéresse aux facteurs de la performance chez des sportifs de haut niveau en escalade.

En fait, seule une étude de 2012 (López-Rivera et González-Badillo, 2012) a déjà travaillé sur ce sujet. Des tests ont été périodiquement réalisés durant 12 semaines sur 2 groupes de grimpeurs élites qui ont suivi un entrainement différent durant 8 semaines, découpé en 2 cycles (cf. figure 9). Un test de force maximale et d'endurance est réalisé une semaine avant le début du 1er cycle (ST1), lors du changement de cycle (ST2), à la fin du 2nd cycle (ST3), deux semaines après la fin du 2nd cycle (ST4) et encore deux semaines après (ST5).

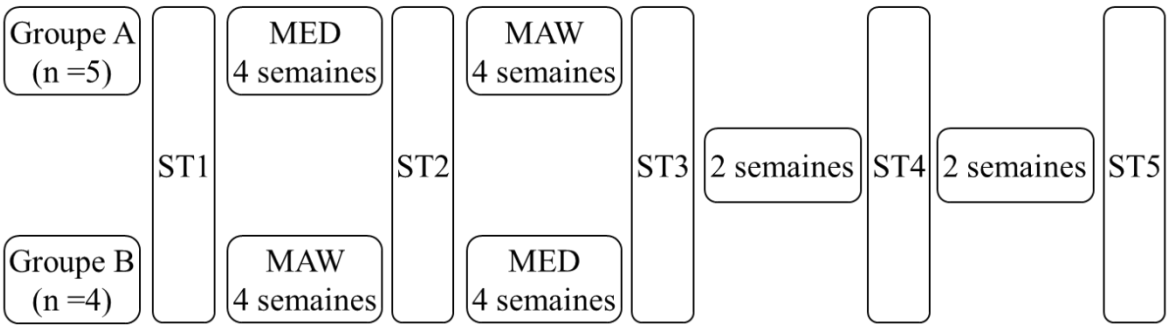


Figure 9 : Illustration du protocole de l'étude

MAW : travail avec charge additionnelle ; MED : travail à poids de corps

(López-Rivera et González-Badillo, 2012)

L'étude conclut sur l'absence de différences significatives entre les deux groupes. Ce travail est intéressant, notamment du point de vue du protocole suivi, mais sa conclusion est

contestable étant donné que trop peu de grimpeurs ont participé à l'étude pour pouvoir espérer obtenir un résultat « significatif » : 5 grimpeurs pour un groupe et 4 pour l'autre.

On peut par conséquent affirmer qu'il n'y a toujours pas, à ce jour, d'étude scientifique qui s'est intéressée de façon rigoureuse à l'évolution de la force maximale volontaire chez des sportifs de haut niveau en escalade. C'est d'autant plus surprenant que, comme on l'a montré précédemment, ce facteur est déterminant dans la performance en escalade dans la discipline du bloc mais également en difficulté. Il est donc aujourd'hui nécessaire d'analyser son évolution, notamment dans le cadre de l'optimisation de l'entrainement d'une discipline qui sera présente pour la 1ère fois lors des prochains jeux Olympiques de 2020.

On peut également montrer qu'à ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution du RFD à la suite d'un entrainement spécifique de grimpeurs de haut niveau. Ainsi, là encore, ce travail de recherche est novateur.

– Résumé –

Les contraintes mécaniques des membres supérieurs sont importantes en escalade. Plusieurs muscles agissent au niveau de la main lorsque le grimpeur saisit et tient une prise. Ses performances sont notamment liées à la capacité de ses muscles fléchisseurs superficiels et profonds des doigts qui réalisent la flexion des doigts puis en assurent la contraction isométrique.

Des études ont montré que deux indicateurs sont particulièrement déterminants dans la performance en escalade : la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts et le taux de développement de cette force (RFD).

- La force maximale représente le niveau de contraction maximale qu'un muscle ou un groupe de muscles peut générer. Elle est discriminante dans l'évaluation du niveau d'expertise d'un grimpeur.

- Le RFD représente la capacité à produire une force le plus rapidement possible. Cette compétence est déterminante lorsque le sportif ne dispose que d'un temps limité pour pouvoir mobiliser sa force maximale. L'escalade se compose de nombreux mouvements dynamiques où le grimpeur doit arriver rapidement sur des prises d'escalade. Il doit donc être capable de mobiliser rapidement la force dont il dispose pour ne pas tomber. Une étude a montré que le RFD est un facteur discriminant entre grimpeurs et non grimpeurs mais également entre les différentes disciplines d'escalade.

L'étude de la force maximale et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts est donc fondamentale dans le cadre d'un travail de recherche qui s'intéresse aux facteurs de la performance chez des sportifs de haut niveau.

Si des études ont montré qu'il y a bien des différences entre des grimpeurs de haut niveau en bloc et en difficulté, aucune n'a encore traité de la comparaison de ces indicateurs chez ceux qui participent aux compétitions internationales. Une seule étude a essayé de mesurer l'évolution de la force maximale en fonction de l'entrainement suivi par des grimpeurs mais sa portée est trop limitée du fait d'un échantillon peu représentatif. Enfin, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution du RFD.

Cette thèse s'attache donc à mettre au point des protocoles d'évaluation de ces deux paramètres et à préciser comment ils peuvent être utilisés en tant que facteurs discriminants de l'expertise en escalade.

III. Facteurs influençant la production de force

Avant d'entreprendre les exigences méthodologiques sur la mesure de la force maximale et du RFD, intéressons-nous aux différents facteurs influençant la production de force. En 2011, Duchateau et Baudry présentent l'ensemble de ces facteurs, illustrés dans la figure ci-dessous (cf. figure 10).

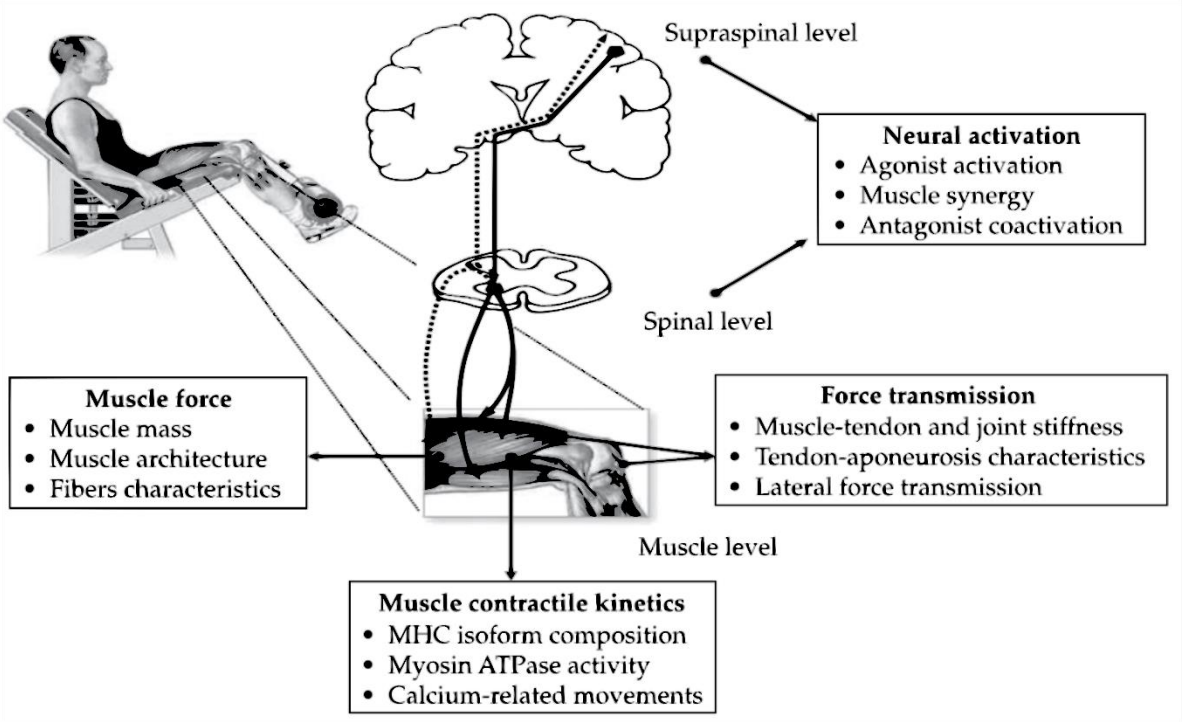


Figure 10: Facteurs engendrant une évolution de la production de la force maximale (Duchateau et Baudry, 2011)

Il a été fait le choix d'aborder uniquement l'influence du facteur nerveux et du facteur structural. Néanmoins, il est important de préciser que la transmission des forces lors du mouvement dû au système tendineux a un impact certain dans la production de force. Il en est de même concernant le système métabolique permettant la création d'énergie (*Adénosine Tri Phosphate = ATP*).

III.1. Facteurs nerveux influençant la production de force

III.1.a. L'importance du recrutement et des décharges des unités motrices

Une étude de 1988 montre que l'évolution de la force maximale volontaire est liée à une adaptation du facteur nerveux (Duchateau et Hainaut, 1988). En effet, à la suite d'un

entrainement spécifique de 6 semaines, les résultats montrent que les gains au niveau de la force produite lors d'une contraction tétanique sont plus faibles que les gains lors d'une contraction volontaire maximale (cf. figure 11), suggérant alors une adaptation nerveuse.

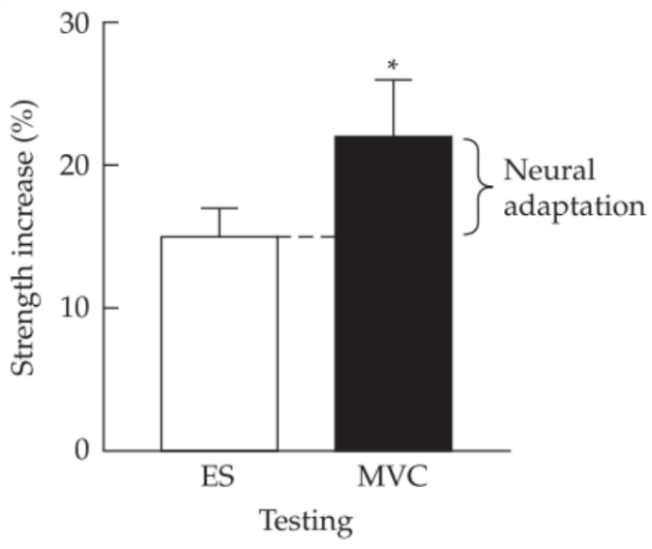


Figure 11 : Comparaison de la force sur une contraction volontaire et tétanique (Duchateau et Baudry, 2011) ; données issues de (Duchateau et Hainaut, 1988)

Des études montrent qu'un entrainement spécifique engendre des adaptations nerveuses notamment au niveau du recrutement des unités motrices[3] (UM) [(Carroll et al., 2001) ; (Duchateau et al., 2006)]. Ces dernières sont recrutées selon un ordre précis qui suit le principe de taille d'Henneman (Henneman, 1957). Par conséquent, les unités motrices ayant les plus petits diamètres et présentant les seuils d'activation plus faibles sont recrutées avant celles qui présentent de plus gros diamètres.

Les unités motrices des muscles cibles se synchronisent pour augmenter la force produite. Il s'agit du recrutement spatial. De plus, si la production de force doit être plus importante, il y a une augmentation de la fréquence de décharge du motoneurone qui augmente la force produite par une même UM (Enoka et Fuglevand, 2001). Il s'agit ici du recrutement temporel. Il est également possible de parler d'augmentation de la fréquence des

[3] Ce terme comprend le motoneurone ainsi que les fibres musculaires qu'il innerve. Chaque motoneurone innerve plusieurs fibres musculaires. Néanmoins, une fibre musculaire ne peut être innervée que par un seul motoneurone.

décharges des unités motrices. La figure ci-dessous illustre le recrutement temporel et spatial (cf. figure 12).

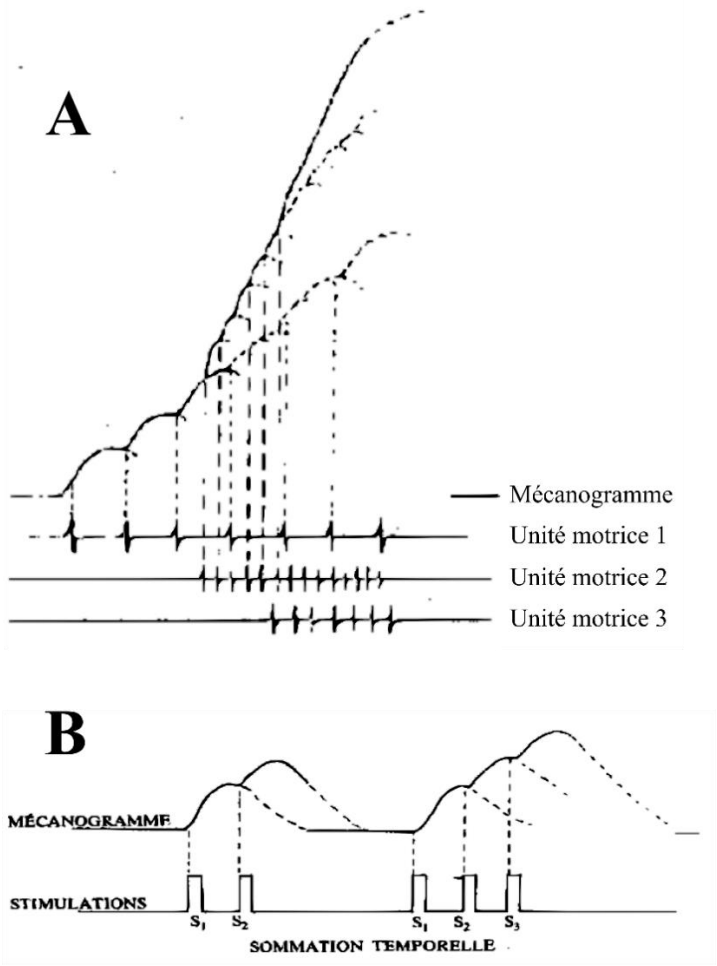


Figure 12 : Illustration du recrutement spatial (A) et temporel (B).
(Doutreloux, Masseglia et Robert, 1992)

Carroll et al. 2001 expliquent, à partir de différents articles, qu'un entrainement isométrique aurait un impact sur le facteur nerveux et plus particulièrement, concernant la synchronisation du recrutement des unités motrices [(Sears et Stagg, 1976) ; (Datta, Farmer, et Stephens, 1991)]. Duchateau et al. (2006) montrent quant à eux, que l'entrainement engendre également une évolution de la fréquence de décharges des unités motrices.

III.1.b. Coordination inter musculaire et réduction de l'activation de l'antagoniste

Il est montré qu'une augmentation de la production de force peut également s'expliquer par une meilleure coordination de l'activité musculaire entre les muscles

synergistes et posturaux, impliqués dans la tâche (Carroll et al., 2001). Par conséquent, la contribution des muscles synergistes, lors de la stabilisation posturale, améliore l'efficacité de la transmission de la force du muscle (Le Bozec et Bouisset, 2004).

De plus, une diminution de la co-activation du muscle antagoniste durant la contraction peut engendrer une augmentation de la force maximale (Amiridis et al., 1996).

III.2. Facteurs structuraux influençant la production de force

III.2.a. Descriptions des fibres

Des différents types de fibres musculaires ont un impact sur la force développée par le muscle. Il est possible de catégoriser trois grands types de fibres musculaires qui se différencient au niveau de leur vitesse de contraction, de leur résistance à la fatigue ainsi qu'à la force développée par l'unité motrice [(Staron, 1997) ; (Schiaffino et Reggiani, 2011)].

Il existe tout d'abord les fibres de type I qui libèrent lentement l'énergie nécessaire à la contraction, d'où leur appellation de fibres lentes ou encore « *slow twitch* » ; par conséquent leurs vitesses de contraction est lente. Elles atteignent leurs tensions maximales en 150 ms lors d'un mouvement balistique (mouvement qui se termine par une projection de charge). Elles ont un diamètre plus petit que les autres types de fibres étant alors les premières recrutées lors de la contraction musculaire, selon le principe de taille (Henneman, 1957). Elles produisent peu de force mais sont néanmoins résistantes à la fatigue.

Les fibres de type IIa ou « *fast twitch* » sont des fibres moins résistantes à la fatigue mais sont en mesure de produire d'avantage de force et possèdent une vitesse de contraction plus élevée que les fibres de type I grâce à une composition en myosine libérant plus rapidement l'énergie nécessaire à la contraction.

Enfin les fibres de type IIb, produisent des niveaux de force et de vitesse encore plus importants que les fibres de type IIa mais sont davantage fatigables (Buchthal et Schmalbruch, 1970). Elles atteignent leurs tensions maximales en 60 ms. Cette différence au niveau de la typologie des fibres musculaires influence donc la vitesse et la production de force externe du muscle. En d'autres termes, cette différence a un impact sur la puissance produite par le muscle (Bottinelli et al., 1996) (cf. figure 13).

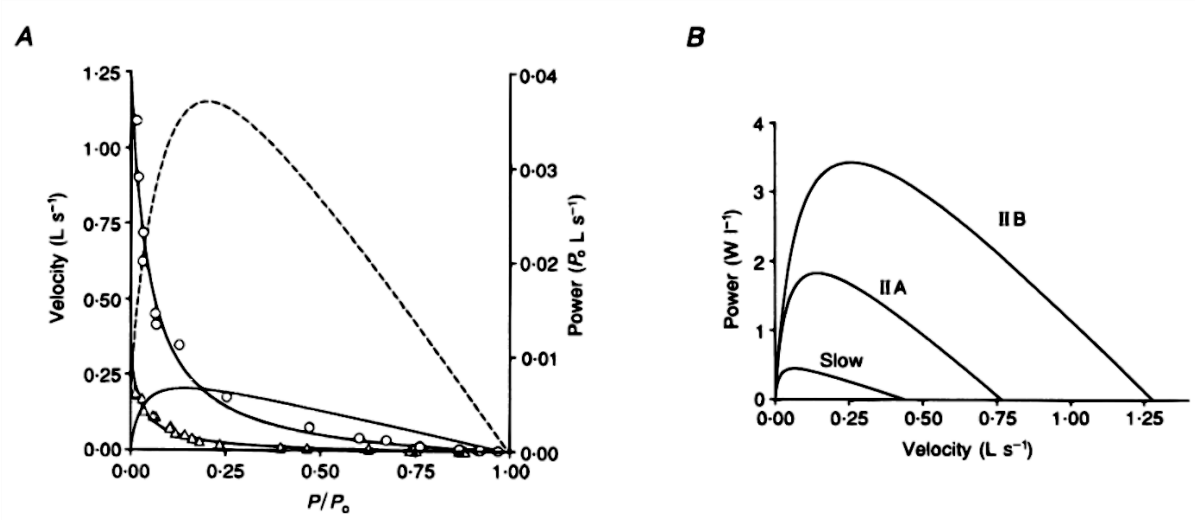


Figure 13 : Courbes force vitesse (A) et force puissance (B) en fonction des types de fibres (Δ) fibres de type I ; (o) fibres de type IIb - Puissance exprimée en Watts/litre.

(Bottinelli et al., 1996)

La répartition des fibres de type I et II peut être très différente pour un muscle en fonction des individus. Par exemple, le pourcentage de fibres de types II du vaste latéral peut varier entre 25% et 80% (Andersen, 2001). Ces différences ont nécessairement un impact sur les qualités physiques et donc sur la production de force maximale développée par le sportif. Le tableau ci-dessous permet de récapituler les caractéristiques des différentes fibres musculaires (cf. tableau 2).

	Fibres de type I (ST)	Fibres de type IIa (FTa)	Fibres de type IIb (FTa)
Section du motoneurone	Environ 30 µm	40 à 60 µm	Jusqu'à 70 µm
Seuil d'excitation	Faible	Moyen	Elevé
Section de la fibre nerveuse	Environ 9 µm	10 à 15 µm	Environ 20 µm
Fréquence de la décharge	30 imp. / s	90 imp. / s	150 imp. / s
Vitesse de transmission de la FM	Environ 2.5 m / s	3.5 m/ s	Environ 5.5 m/ s
Force de la FM, impulsion unique	70 mg	80-90 mg	100 mg
Durée de la contraction balistique	150 ms	80-140 ms	60 ms
Force / unité motrices	2-13 g	5-50 g	30-130 g

Tableau 2 : Classification et paramètres des types de fibres musculaires

(Weineck, 1997) inspiré de (Tidow et Wiemann, 1993)

III.2.b. Différences au niveau des aspects architecturaux

Au-delà des différences au niveau des fibres musculaires, la structure du muscle est très disparate entre chaque individu. Ces différences s'expriment à travers des aspects architecturaux, notamment :

- la longueur des faisceaux musculaires, c'est-à-dire la distance entre l'aponévrose profonde et superficielle.

- l'angle de pennation défini comme l'angle que forment les fibres musculaires par rapport à l'axe selon lequel le muscle exerce une force.

- la surface de section transversale (physiological cross sectionnal area : PCSA) étant l'aire de la section transversale d'un muscle perpendiculaire à ses fibres.

Ces aspects sont déterminants dans les capacités de production de la force musculaire (Lieber et Fridén, 2000). En effet, l'augmentation de la longueur des fascicules se traduit par un développement du nombre de sarcomères en série, permettant d'augmenter la vitesse de raccourcissement du muscle (Reeves et al., 2009). L'augmentation de l'angle de pennation permet une augmentation de la PCSA anatomique, en d'autres termes une augmentation de la densité du matériel contractile disponible et du nombre de sarcomères en parallèle (Reeves et al., 2009). Ces augmentations d'angle de pennation et de PCSA sont corrélées à une augmentation de la production de force [(Hakkinen et al., 1998) ; (Lieber et Fridén, 2000)]. Ci-dessous figure une illustration de l'angle de pennation (cf. figure 14).

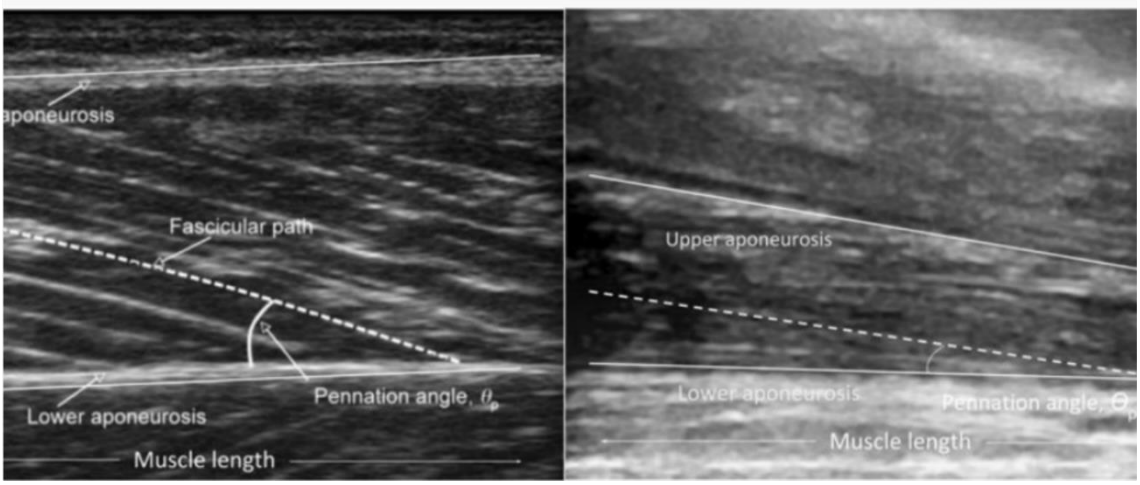


Figure 14 : Illustration de l'angle de pennation d'une vue longitudinale d'un quadriceps droit par IRM (imagerie à résonnance magnétique).

(Formenti et al., 2019)

– Résumé –

De nombreux facteurs influencent la production de la force chez le sportif. Ce travail doctoral s'est volontairement centré sur les paramètres nerveux et structuraux.

L'activation d'un muscle s'explique par la sollicitation des unités motrices (complexe motoneurone et fibres innervées par ce dernier). Afin d'augmenter la production de force, deux phénomènes s'opèrent, à savoir le recrutement spatial ; et le recrutement temporel qui s'explique par l'augmentation de la fréquence des décharges des unités motrices. De plus, une meilleure synergie entres les muscles responsables de la contraction et les muscles posturaux permet également une meilleure production de la force.

Concernant le facteur structural, le type de fibres (I, IIa et IIb) composant le groupe musculaire, a une incidence sur la production de force qui en découle. En outre, des propriétés architecturales du muscle, à savoir les angles de pennations, la longueur des fascicules mais également la surface de section transversale peuvent avoir une incidence sur la production de la force.

IV. Approche méthodologique de l'analyse de la force maximale

L'objectif de cette partie est de présenter les exigences méthodologiques liées à l'étude de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts.

IV.1. Outils de mesure pour l'analyse de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts

En 2004, Watts a construit un tableau récapitulatif des études qui ont mesuré la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts en fonction du niveau d'expertise, à l'aide de différentes variantes du « Handgrip dynamometer » (Watts, 2004) (cf. tableau 3).

Reference	No. of subjects (male/female), ability	Test mode	Strength (N)
Watts et al. 1993	21 (M), (mean) 5.13c/8b	Handgrip dynamometer	506.0 (62.8)
Cutts & Bollen 1993	13 (M), 5.8/5b–5.12a/7b (mean)	Handgrip dynamometer	519.8 (56.9)
Grant et al. 1996	10 (M), >5.10a/6a	Handgrip dynamometer	532.5 (22.6)
Grant et al. 1996	10 (M), >5.10a/6a	"Open" grip with 4 fingers	446.2 (30.4)
Watts et al. 1996	11 (M), 5.13b/8a (mean)	Handgrip dynamometer	581.6 (69.6)
Ferguson & Brown 1997	5 (M), 5.11c–5.13b/7a–8a	Modified handgrip dynamometer	713.9 (34.3)
Watts et al. 2000	5.12c–5.14b/7c–8c	Handgrip dynamometer	507.0 (73.6)
Watts et al. 2003b	52 youth (M), 5.11d/7a (mean)	Handgrip dynamometer	357.9 (126.5)
Watts et al. 1993	18 (F), 5.12c/7c (mean)	Handgrip dynamometer	335.4 (60.0)
Grant et al. 2001	10 (F), ~5.9/5c	Handgrip dynamometer	337.4 (11.8)
Grant et al. 2001	10 (F), ~5.9/5c	"Open" grip with 4 fingers	320.7 (11.8)
Watts et al. 2003b	38 youth (F), 5.11b/6c (mean)	Handgrip dynamometer	246.1 (66.7)

Tableau 3 : Récapitulatif des différentes études sur la force des muscles fléchisseurs des doigts. (Watts, 2004)

Les résultats récapitulés dans ce tableau montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre des grimpeurs élites ayant un niveau 8b (Watts et al., 1993) et des non grimpeurs (Grant et al., 1996). Ce constat a été confirmé par une étude de 2016 qui s'est attachée à comparer des grimpeurs élites, confirmés et novices en utilisant un test à nouveau basé sur le « Handgrip dynamometer ». Cette étude conclut une absence de différence significative : 450 ± 122 N pour les novices, 548 ± 120 N pour les confirmés et 567 ± 121 N pour les élites (Laffaye et al., 2016).

Ces résultats sont surprenants; ce qui a conduit à s'interroger sur la pertinence de la force exercée par les muscles fléchisseurs des doigts pour serrer le « handgrip dynamometer ». Ce n'est en effet pas le même geste et pour bien le comprendre il suffit de

regarder la figure ci-dessous qui présente l'utilisation de certains des appareils utilisés dans les précédentes études (cf. figure 15).



Figure 15 : Appareils de mesure de la force de flexion complète de l'ensemble des doigts.

Il y apparaît clairement que, pour exercer la force appropriée sur la poignée, il faut ajouter à la flexion des doigts une contraction concentrique de l'ensemble de la main. Cela ne correspond pas au geste du grimpeur et explique sûrement l'absence de différence rapportée dans ces études.

Les études plus récentes [(Vigouroux et Quaine, 2006) ; (Michailov et al., 2018)] ont donc proposé des tests qui permettent de mesurer spécifiquement la force maximale isométrique des doigts. Comme montré dans la figure ci-dessous, les tests les plus récents continuent à utiliser le « handgrip dynamometer » mais, cette fois-ci, seule la dernière phalange est en contact avec l'appareil de mesure (cf. figure 16). Avec ces nouvelles conditions expérimentales, les résultats obtenus sont maintenant en adéquation avec les évaluations qualitatives car ils montrent qu'il y a effectivement une différence importante entre les grimpeurs élites et les non grimpeurs (412,3 ± 40,9 N contre 361,6 ± 52,1 N).

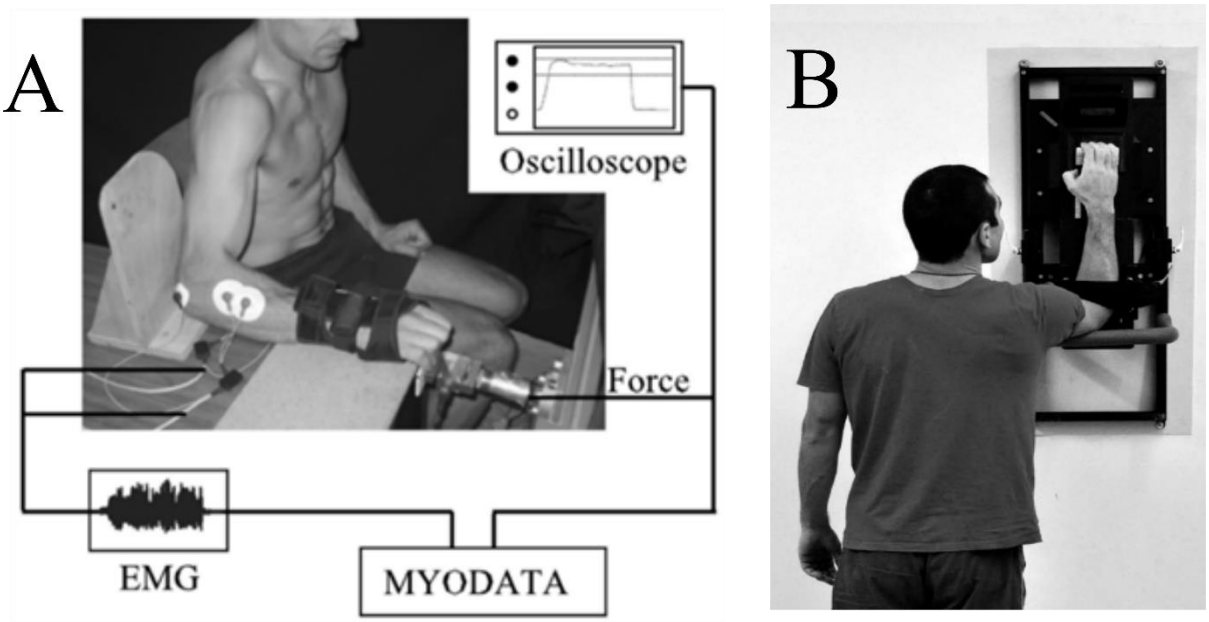


Figure 16 : Mesure de la force des muscles fléchisseurs superficiels et profonds des doigts. [(A) (Vigouroux et Quaine, 2006) ;. (B) (Michailov et al., 2018)].

Tout ceci démontre l'intérêt de la mise au point d'un test permettant de mesurer de manière fiable et spécifique la force maximale que les muscles fléchisseurs des doigts sont capables d'exercer lorsqu'ils sont mobilisés par le grimpeur.

IV.2. Evolution de la force maximale en fonction du type de préhension

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que d'une prise que le grimpeur doit saisir et tenir, mais il y a en fait une multitude de formes de prises. Pour chacune, la position des doigts, mais également l'angle du poignet sont différents, ce qui a bien-sûr un impact sur la façon de répartir la force développée. Ainsi, à chaque forme de prise correspond une préhension particulière. Il serait illusoire de vouloir les étudier chacune séparément tant le champ des possibilités est large. L'idée est donc de les regrouper dans des types principaux de préhensions, une préhension particulière étant alors considérée comme une simple déclinaison du type auquel elle est rattachée. Trois types de préhensions peuvent être identifiées : celles tendues, semi tendues et arquées (cf. figure 17). La préhension tendue se caractérise par une flexion des interphalangiennes distales (IPD) accompagnée d'une légère flexion des interphalangiennes proximales (IPP). Pour la préhension semi tendue, l'angle entre l'IPP et l'IPD est de 90 degrés. Enfin en arquée, le pouce appuie sur les phalanges 2 et 3 et se caractérise par une hyper extension de l'IPD ainsi que par un angle de 90 degrés au niveau de l'IPP.

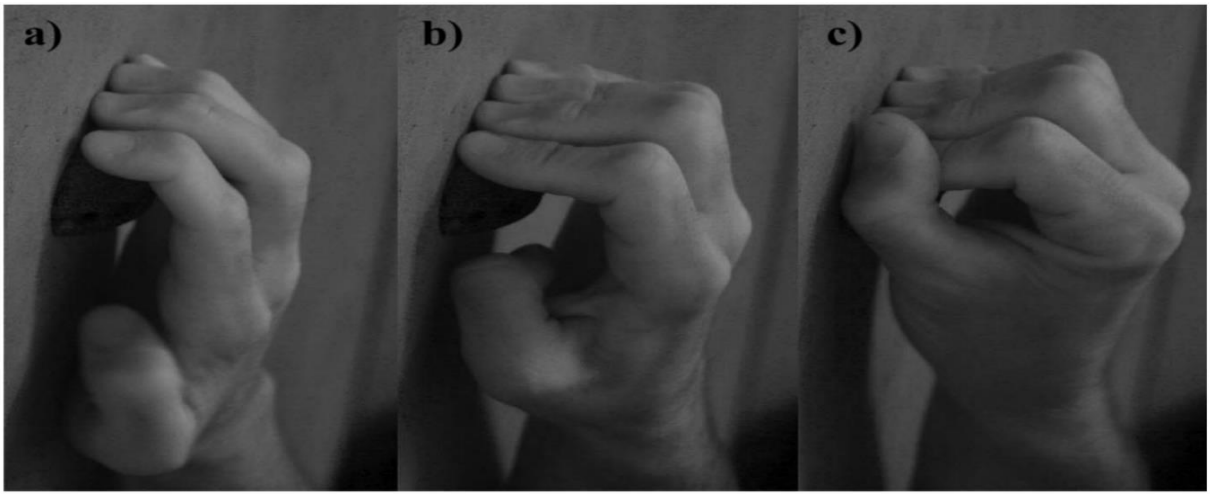


Figure 17 : Représentations des différents types de préhensions identifiés en escalade
(a) tendue ; (b) semi tendue ; (c) arquée.
(Amca et al., 2012)

Il est expliqué dans le paragraphe précédent que ces trois types de préhensions sollicitent différemment les muscles fléchisseurs. En fait, il faut également prendre en compte la taille de la prise d'escalade car elle influe aussi sur la répartition de la force maximale développée, comme l'a montré une étude de 2012 (Amca et al., 2012). La figure ci-dessous, tirée de cette étude, montre ainsi, que pour une prise d'escalade de 1 cm, la force maximale produite par le grimpeur est significativement plus importante en préhension arquée par rapport aux autres conditions (439 ± 55,5 N en préhension arquée, 360,8 ± 34,6 N en semi tendue et 350,8 ± 56,0 N en tendue) et que, pour une prise de 4 cm, l'ordre est inversé entre la préhension tendue et celle semi tendue (575,7 ± 54,5 N en tendue versus 517,11 ± 50,1 N en semi tendue). (cf. figure 18).

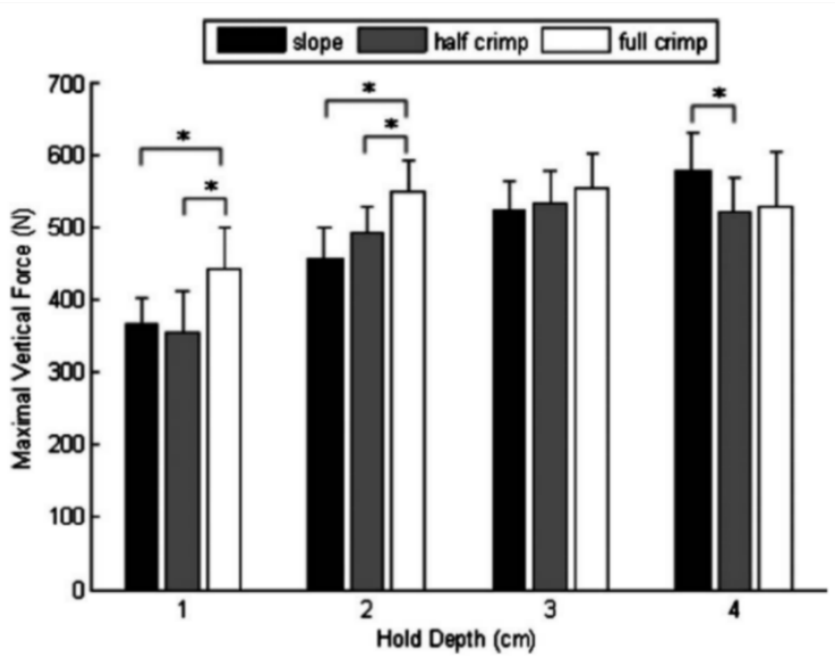


Figure 18 : Moyenne des forces verticales maximales (N)
(*) à p < 0,05 pour chaque taille de prise.
(Amca et al., 2012)

Ceci démontre que la force exercée par le sportif sur une prise d'escalade dépend bien de sa forme mais également de sa taille.

Une étude de 2011 (Quaine et al., 2011) montre l'intérêt du pouce dans la préhension arquée. Il permet ainsi d'augmenter la résultante de la force de l'ensemble des muscles fléchisseurs des doigts et de la main sur la prise d'escalade : 422,0 ± 42,9 N sans le pouce, *versus* 494,8 ± 68,8 N avec le pouce. L'étude montre que cette différence significative s'explique principalement par une augmentation de la force exercée par l'index lorsque le pouce est présent, cette augmentation étant cependant légèrement contrebalancée par l'effet inverse pour l'auriculaire.

Pour finir cette discussion sur l'impact des types de préhensions, il faut rappeler que l'objectif du présent travail est d'analyser spécifiquement la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts. Il est donc primordial de limiter l'angle appliqué au poignet afin de s'affranchir du facteur de biais potentiel lié à une sollicitation des muscles responsables de la flexion du poignet.

IV.3. Forces maximales absolues et normalisées des muscles fléchisseurs des doigts

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts est un indicateur pertinent du niveau d'expertise d'un grimpeur. Cependant, il convient de s'interroger sur la façon de l'exprimer : la force maximale, doit-elle être en valeur absolue ou bien normalisée à la masse du sportif ? Dans son étude de 2003, Watts a expliqué que la pratique en escalade se réalise « à poids de corps » (Watts et al., 2003). Il ne serait donc pas judicieux d'analyser uniquement une force absolue sachant qu'elle dépend forcément de la masse des athlètes. Le tableau ci-dessous (cf. tableau 4) montre les différences de masse en fonction du niveau d'expertise du grimpeur.

	Sexe (M & F)	Niveau d'expertise	N	Age	Masse (kg)
Laffaye et al. 2016	M	Elite (>8a)	10	27,3 ± 15,2	**67,2 ± 13,6**
Ozimek et al. 2017	M	Elite (8b/8c)	6	≈ 28,5 ± 6,1	**66,9 ± 5,8**
Michailov et al. 2009	M	Elite (>8a+)	18	25,8 ± 5,1	**67,3 ± 6**
Ryepko 2013	M	Elite	10	≈ 19 et 22	**68**
Vigouroux et al. 2018	M	Elites (7c / 8b+)	10	21,4 ± 2,6	**65,9 ± 5,9**
Balas et al. 2014	M	Elite (>8a+)	5	24,0 ± 7,6	**65,5 ± 4,9**
Amca et al.2012	M	Confirmés	10	22,3 ± 4,5	**72,7 ± 5,7**
Grants et al. 1996	M	Novices (6a)	10	??	**74,5 ± 9,6**
Balas et al. 2014	M	Non grimpeur (3+)	7	25,9 ± 8,2	**75,7 ± 8,5**
Laffaye et al. 2014	M	Novices (<6a)	10	21,5 ± 7	**73,7 ± 13,0**

Tableau 4 : Récapitulatif de la masse des athlètes en fonction du niveau d'expertise.

Les valeurs qui y sont présentées montrent que la masse corporelle moyenne est de 66,8 kg pour les grimpeurs élites et de 74,6 kg pour les grimpeurs novices, soit une différence de 10,5 %. En conclusion, la force maximale doit être mesurée en valeur normalisée dans le cadre des comparaisons entre groupes de différents niveaux d'expertise.

– Résumé –

La force maximale volontaire est un indicateur déterminant du niveau d'expertise d'un grimpeur. Il s'agit de la force (N ou $N.kg^{-1}$) la plus importante que ce dernier est capable de développer durant une flexion maximale des doigts.

La mesure de cette force maximale des muscles fléchisseurs des doigts (FSD et FPD) nécessite de disposer d'un test qui soit à la fois fiable et spécifique. Ainsi, seules les études durant lesquelles les grimpeurs positionnent uniquement la dernière phalange en contact avec le dynamomètre révèlent l'existence de différences importantes entre les grimpeurs élites et novices.

L'exercice de l'escalade se traduit par la succession d'une multitude de préhensions différentes. Celles-ci sont regroupées dans 3 principaux types de préhensions : la préhension tendue, semi tendue et arquée. Il est indispensable d'en tenir compte dans l'évaluation des grimpeurs car elles ont une incidence sur la répartition de la force maximale développée.

La pratique en escalade se réalise « à poids de corps ». Il reste donc pertinent d'évaluer la force en valeur absolue pour un grimpeur donné, mais il faut également la normaliser avec la masse, lorsqu'il s'agit de comparer des athlètes.

V. Approche méthodologique de mesure du RFD

Il semble maintenant important de présenter précisément les exigences méthodologiques lors de l'analyse du taux de développement de la force. Cette partie permet de prendre position et de justifier la démarche expérimentale suivie lors des études 1 et 2.

V.1. RFD tétanique et contractile

Plusieurs types de RFD peuvent être évalués. Tout d'abord, il y a le RFD « tétanique ». Il correspond à la force développée par le muscle lors d'une contraction non volontaire. Elle peut être mesurée en réalisant des stimuli électriques par une stimulation percutanée du nerf (Folland, Buckthorpe, et Hannah, 2014) et permet d'analyser les capacités contractiles du muscle sans mobiliser l'influx nerveux volontaire (Folland et al., 2014). Néanmoins, dans le cadre de la recherche de compréhension d'un mouvement sportif spécifique, mesurer un RFD tétanique ne semble pas approprié. En effet, il a été fait comme choix d'analyser une contraction volontaire de flexion de doigts. Par conséquent, il s'agit de mesurer le RFD « contractile ». Le graphique ci-dessous représente les deux signaux des contractions tétaniques et volontaires (cf. figure 19).

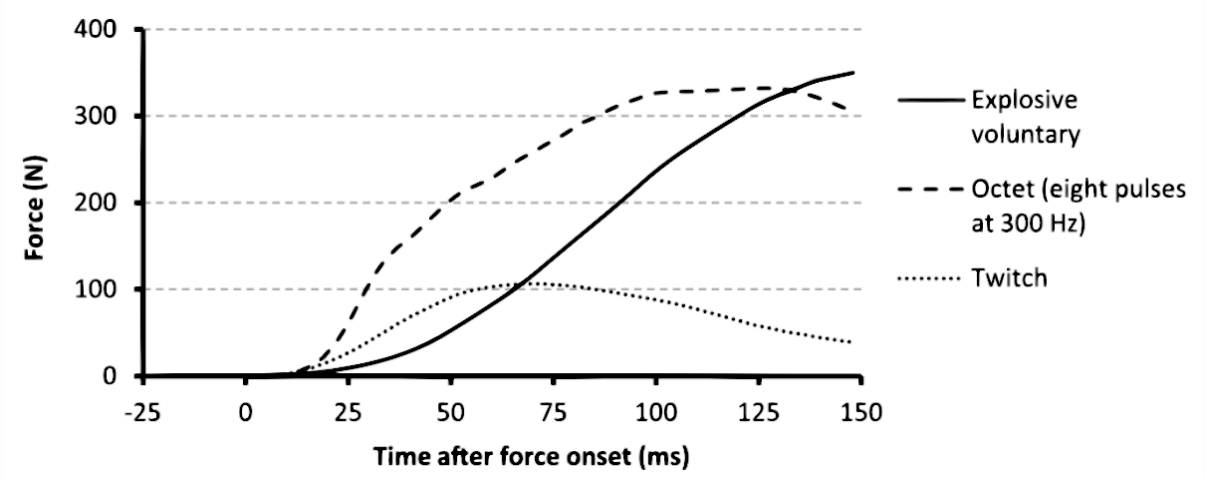


Figure 19 : Comparaison entre contraction tétanique et volontaire.
(Folland et al., 2014)

Concernant le RFD analysé lors d'une contraction volontaire, deux types des mesures sont envisageables. Il est possible de mesurer le RFD absolu ou normalisé par rapport à la FMV (force maximale volontaire). Le fait de normaliser permet d'exprimer la capacité de génération de la force disponible dans une situation explosive (Aagaard et al., 2002).

Néanmoins, dans le cas où la force maximale volontaire n'évolue pas, prendre le RFD absolu semble davantage pertinent. Dans le cadre de ce travail de recherche et notamment dans l'évolution du RFD à la suite d'un entrainement spécifique, il sera mesuré un RFD absolu. Ci-dessous est présenté un graphique illustrant ces deux RFD dans le cas où il n'y a pas d'évolution de la FMV (cf. figure 20).

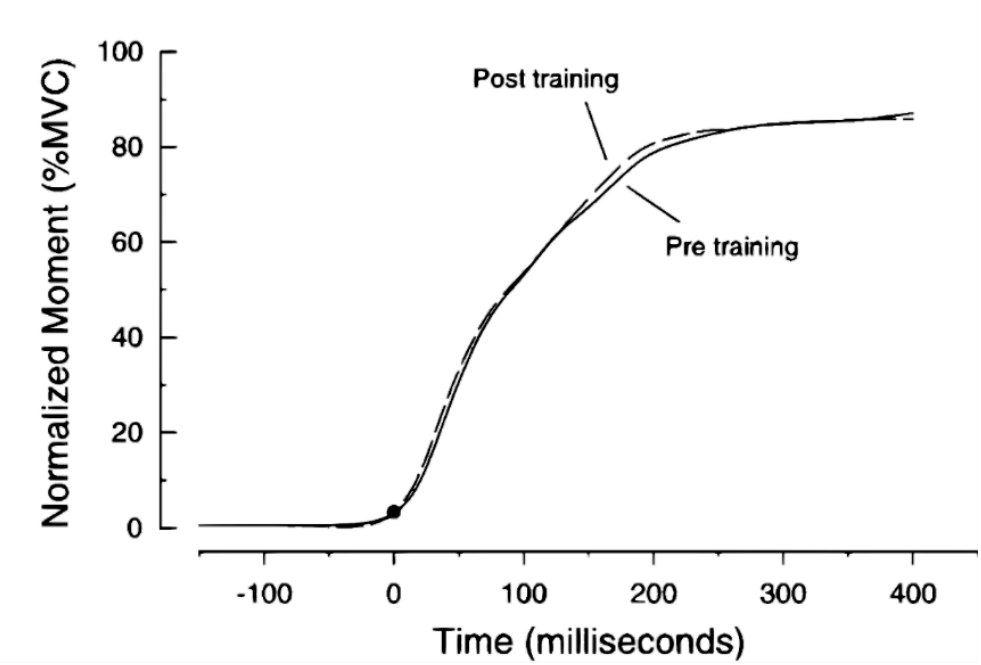


Figure 20 : Evolution de la force en fonction du temps en pré et post entrainement.
(Aagaard et al., 2002)

Le RFD apparaît comme étant un indicateur plus instable que le FMV, (Tillin et al., 2010). En effet, le RFD calculé entre 0 et 50 ms (CV[4] entre 12,8% et 16,6%) est moins fiable que le RFD mesuré entre 0 et 100 ms (CV entre 4,5 et 5,3%) ainsi que le RFD mesuré entre 0 et 150 ms (CV entre 4,5 et 5,1%) [(Buckthorpe et al., 2012) ; (Tillin, Pain et Folland, 2011)]. Cette grande variabilité des mesures des RFD lors de la phase initiale semble être principalement due à des facteurs neuronaux ainsi qu'aux différences interindividuelles. Par conséquent, il est important de calculer les coefficients de variations lors d'un test afin d'analyser et de contrôler la fiabilité des mesures.

[4] CV : Il s'agit du coefficient de variation : paramètre statistique exprimant en pourcentage la variation entre les valeurs.

V.2. Description des outils de mesure

Dans sa revue de littérature, Maffiuletti et al. (2016) énoncent que le RFD est un facteur complexe à mesurer, principalement lors de la première phase d'installation de la force (<75ms). De nombreux facteurs liés à la qualité de l'outil de mesure, à l'analyse de la mesure du RFD mais également les informations données aux sportifs, ont un impact sur le résultat. Par conséquent, un certain nombre d'exigences doivent être respectées.

Tout d'abord, la tâche analysée doit être spécifique à l'activité en mettant en jeu les groupes de muscles voulus (flexion des doigts) (Bellumori, Jaric et Knight, 2011).

V.2.a. Importance du type de dynamomètre

Ensuite, lors de l'utilisation du dynamomètre, plusieurs paramètres doivent être contrôlés. Tout d'abord, il est nécessaire de limiter, au maximum, la compliance du capteur. C'est-à-dire qu'il faut éviter que le dynamomètre se déforme lorsque le sportif agit dessus. Cela aura un effet d'absorption de l'effort qui viendrait minimiser les résultats mesurés car une partie de l'énergie développée ne serait pas prise en compte. Cette indication limite donc l'utilisation des dynamomètres où le groupe de muscles appuie sur une poignée, pour réaliser un mouvement concentrique. Il est alors plus intéressant d'analyser un mouvement isométrique sur un dynamomètre qui ne se déforme pas.

La première phase de RFD (0-50 ms) est importante dans la compréhension de la performance [(De Ruiter et al,. 2006) ; (Tillin et al., 2010)]. Il donc est important que l'appareil d'enregistrement possède un faible bruit afin d'analyser les différences de RFD dans les premières phases de contractions (Maffiuletti et al., 2016). Si le bruit du signal est trop important, il serait plus compliqué de définir précisément le départ de la contraction musculaire (cf. figure 21).

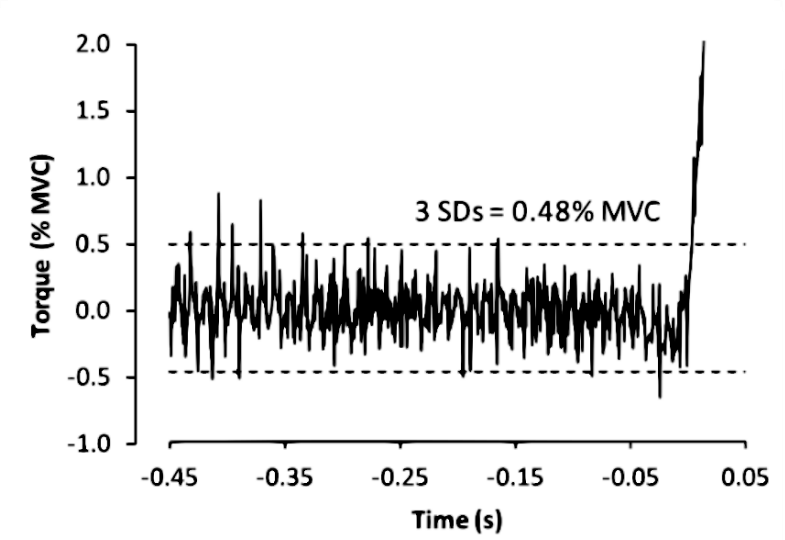


Figure 21 : Illustration d'un bruit du signal d'un dynamomètre.
(Maffiuletti et al., 2016)

V.2.b. Importance de la calibration du dynamomètre

La fréquence du signal doit être calibrée à 1000 Hz ou 1 KHz minimum pour plusieurs raisons. Cela permet, de mesurer avec précision le RFD produit par les muscles squelettiques, de synchroniser (si nécessaire) précisément le signal avec un EMG et enfin de mesurer exactement le retard électronique qui est de 7,3 ms et de 13,5 ms pour les contractions involontaires et volontaires (Tillin et al., 2010). Enfin cette fréquence élevée permet d'identifier efficacement le départ de la contraction manuellement et de limiter l'effet du bruit (Tillin, Pain et Folland, 2013b).

V.2.c. Détermination du départ de la contraction

Concernant le début de la contraction, plusieurs choix sont possibles. Les expérimentateurs peuvent définir un seuil, c'est-à-dire une différence de valeurs minimum qui est supérieure au bruit du signal, par exemple 7,5 N.m (Andersen et Aagaard, 2006) . Ce seuil peut également être défini par rapport à un pourcentage de la contraction maximale volontaire (2% de la FMV (Granacher, Gruber et Gollhofer, 2009) ou encore 2,5% de la FMV (Johnson et al., 2015)). Toutefois, prendre un seuil trop bas ainsi que l'automatiser peut biaiser les résultats, notamment lorsque les capteurs sont utilisés avec des bruits assez importants. En effet, le départ peut être dû non pas à une contraction mais plutôt à un bruit.

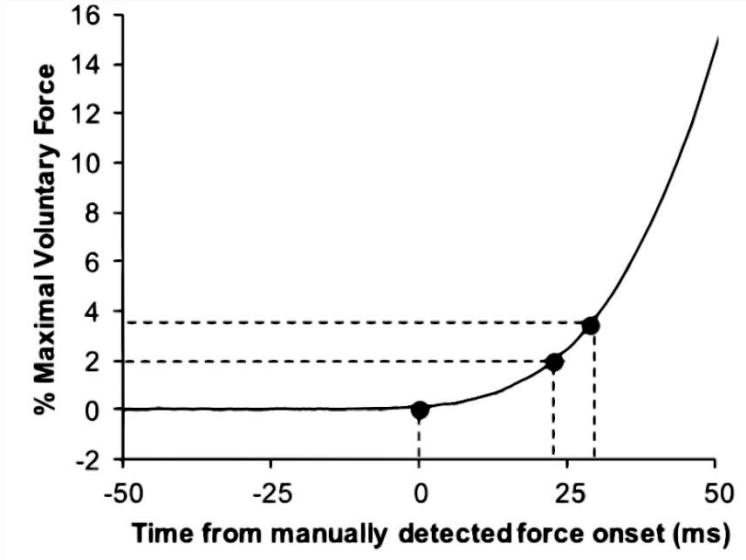


Figure 22 : Courbe de force en fonction du temps durant une contraction explosive lors d'une extension de genou. Le départ a été détecté manuellement en utilisant la méthode de Tillin (Tillin et al., 2010). D'autres systèmes automatiques de détections utilisent des départs entre 2 et 3.6% de la FMV. Dans cet exemple, le départ serait détecté 24-30 ms après le réel départ de la contraction.
(Tillin et al., 2013b)

En utilisant des systèmes automatiques, les données sont biaisées surtout dans les débuts de l'installation de la force. Les valeurs de RFD mesurées dans les 50 premières millisecondes seront nécessairement fausses. Une autre approche est d'analyser uniquement manuellement le départ. Certains auteurs énoncent « que le départ débutera après le dernier creux du bruit avant l'initiation de la contraction » (Tillin et al., 2010).

Néanmoins, ce choix quant à l'identification du départ de la contraction fait encore débat dans la littérature scientifique et certains auteurs s'opposent. Centrons nous sur l'article de Tillin publié en 2013 et qui répond à une méthodologie donnée par Thompson [(Tillin, et al., 2013b) ; (Thompson et al., 2012)]. Tillin et al. (2013) préconisent une identification manuelle car les résultats sont plus fiables alors que Thompson et al. (2012) mettent en avant le fait qu'une identification automatique donnerait des résultats plus pertinents (cf. figure 22). Il semble donc très important d'avoir un bruit le plus faible possible avec une fréquence importante (1000 Hz) afin d'identifier correctement le départ de la contraction.

V.3. Contraintes des indications données aux sujets ainsi que le nombre d'essais

De nombreuses indications doivent être fournies au sportif avant de réaliser le test. En effet, la principale difficulté est de développer une force maximale la plus importante et le plus rapidement possible. Sans recommandation de la part de l'expérimentateur, l'athlète fait inconsciemment le choix de développer, soit la force maximale, soit une force importante le plus rapidement possible. Une étude de 2001 met en avant une augmentation du pic du RFD de 20 à 46% lorsque l'objectif est d'aller le plus rapidement possible au détriment de la FMV (Sahaly et al., 2001). Afin de limiter ces biais, qui ont un impact important sur les résultats, Maffiuletti et al. (2016) recommandent de bien préciser, à chaque essai du participant, qu'il est nécessaire de créer la tension maximale le plus rapidement possible et d'enlever les essais avec des pics de force trop bas (< 80% de la FMV). De plus, d'autres auteurs préconisent des temps d'efforts très courts entre 2 et 4 secondes avec entre 2 et 3 minutes de récupération (Barry, Warman et Carson, 2005).

Les feedbacks et les interprétations données aux sujets, après chaque contraction sont importants afin qu'ils tentent d'améliorer la force maximale et le RFD. Des encouragements doivent être faits pendant chaque essai. Ces indications ont un impact tant sur le pic du RFD (Tillin et al., 2010) que sur le temps entre 2-30% de la FMV (De Ruiter et al., 2004).

Une familiarisation de l'effort doit être réalisée en amont afin que les sportifs s'approprient l'effort. Maffiuletti et al. (2016) recommandent 5 essais par condition, afin de mesurer correctement le RFD et de prendre les 3 meilleurs essais. Néanmoins, si le nombre de conditions est trop important, il est possible de réduire le nombre d'essais à 3 afin de limiter au maximum les effets liés à la fatigue. Enfin, les mouvements avec des pré-tensions (agonistes – antagonistes) ou des contre mouvements ne doivent pas être retenus lors de l'analyse des résultats. La position doit être bien standardisée. Lors des 200 dernières millisecondes avant le départ, il est préconisé de ne pas avoir une variation du signal supérieure à 0.5 N en plus du bruit de l'appareil (Blazevich et al., 2009).

V.4. Variables mesurées

Des études prennent comme variable dépendante un pourcentage de la FMV (temps nécessaire pour arriver à 50% de la FMV par exemple) [(Hakkinen, Komi et Alén, 1985) ; (Hannah et Folland, 2015)]. Cette méthode peut être intéressante pour les tâches nécessitant de développer un pourcentage spécifique de la force pour réaliser un mouvement sportif

performant. Or, en escalade, le pourcentage de force nécessaire à produire pour tenir une prise d'escalade, à la suite d'un mouvement dynamique, n'est pas connu.

Une autre variable pouvant être analysée est le pic de RFD. Il s'agit de la variation la plus importante durant la pente d'installation de la force (cf. figure 23). Cette variable ne semble pas pertinente car elle intervient à des moments différents lors de l'installation de la force entre chaque athlète et est trop sensible à la variabilité inter individuelle. Cette donnée peut être néanmoins utilisée dans certaines contractions balistiques très brèves (Casartelli, Lepers, et Maffiuletti, 2014).

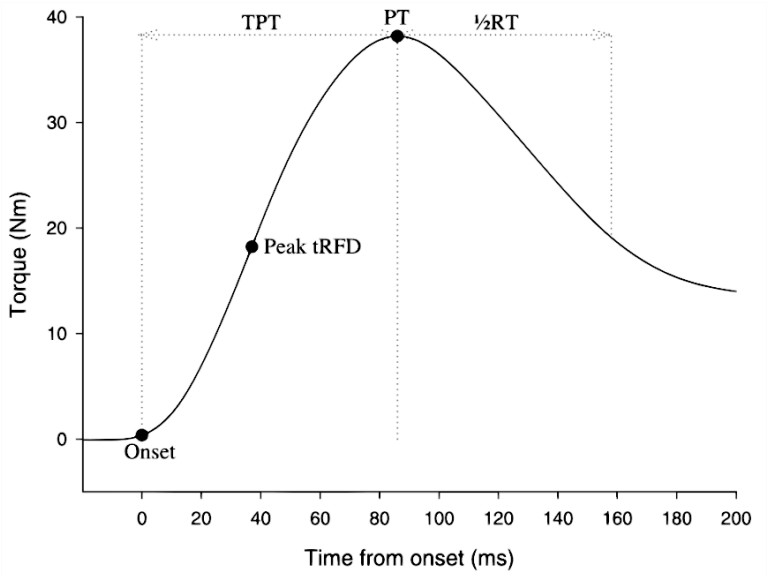


Figure 23 : Illustration du pic de RFD lors de l'installation de la force.
(Andersen et Aagaard, 2006)

Enfin, il est envisageable de prendre comme variable dépendante, le temps. Les expérimentateurs peuvent prendre des valeurs en partant à chaque fois du départ de la contraction (0-50 ms, 0-100 ms, 0-200 ms, etc…). Cela permettra donc d'analyser la production de force durant un temps spécifique (cf. figure 24).

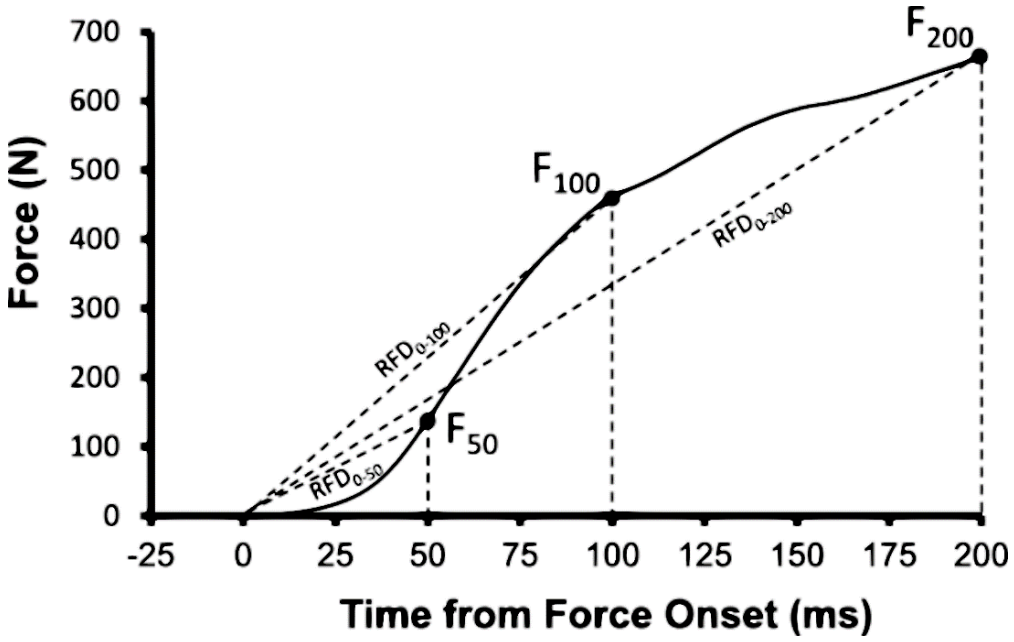


Figure 24 : Présentation des différentes mesures possibles du RFD.

(Maffiuletti et al., 2016)

Aagaard et al. (2002) s'accordent à dire que le début de la pente d'installation de la force (entre 0 et 200 ms) est régi par un facteur nerveux. De plus, une corrélation importante a été montrée entre la FMV et le RFD_{200ms} (cf. figure 25) (Andersen et Aagaard, 2006). Un RFD plus tardif serait également lié à un facteur nerveux mais est aussi associé à des propriétés contractiles du muscle (types de fibres II, propriétés architecturales du muscle).

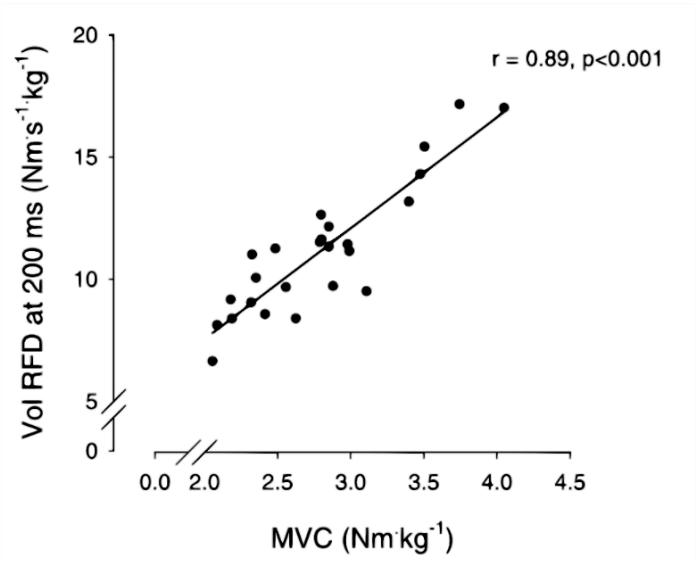


Figure 25 : Relation entre RFD_{200ms} ($Nm.s^{-1}.kg^{-1}$) et FMV ($Nm.Kg^{-1}$).

(Andersen et Aagaard, 2006)

– Résumé –

Dans ce travail de thèse il est choisi d'analyser un RFD contractile et absolu afin de regarder les évolutions de ce paramètre indépendamment de la force maximale. De plus, l'analyse méthodologique du RFD est complexe et demande de nombreuses précisions. A propos des outils de mesure, il est primordial que le dynamomètre ne se déforme pas lors de la contraction musculaire afin de limiter au maximum la compliance. Etant donné que le début de l'installation de la force est analysé, il est important d'avoir un bruit le plus faible possible avec une fréquence de 1 KHz afin de pouvoir définir précisément le départ de la contraction. La détermination de ce départ fait encore débat dans la littérature scientifique et il est possible de définir le départ soit manuellement, soit automatiquement en mettant un seuil de départ.

Les participants doivent produire une contraction la plus forte et la plus rapide possible avec un nombre d'essais suffisant. Enfin, il est possible de mesurer le pic du RFD qui n'est autre que la variation la plus importante durant la pente d'installation de la force. Néanmoins, cette mesure apparaît comme peu fiable et est sujette à de nombreuses variations. Il est également possible de prendre le temps comme indicateur et d'analyser l'évolution du RFD en fonction des différences (50ms, 100ms, 200ms) ; permettant alors une comparaison entre les sportifs.

– Synthèse méthodologique de la force maximale et du RFD –

L'objectif est maintenant de faire un récapitulatif des différentes contraintes méthodologiques qui ont été abordées durant ce chapitre. Il a été montré que les muscles fléchisseurs apparaissent comme étant déterminants dans la performance en escalade.

Deux indicateurs de la performance peuvent être analysés, à savoir la force maximale volontaire et le taux de développement de la force (RFD). De nombreuses contraintes méthodologiques sont indispensables afin de mesurer correctement ces deux paramètres.

Au niveau de la mesure de la force maximale en escalade :

- Le test doit être spécifique et doit bien mesurer la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts.
- l'escalade se traduisant par une multitude de prises différentes, il est important d'analyser plusieurs préhensions. Dans ce travail de recherche, 3 préhensions ont été retenues : la préhension tendue, semi tendue et arquée.
- Etant donné que l'escalade est une activité à poids de corps, il est indispensable de mesurer à la fois une force maximale absolue mais également normalisée. Dans un premier temps, il sera donc nécessaire de rapporter la masse de l'athlète en N (en multipliant par l'accélération gravitationnelle). Puis, il sera divisé la force produite par les muscles fléchisseurs des doigts par la masse de l'athlète mis en N. Cette force normalisée sera donc une valeur sans unité.
- . C'est-à-dire qu'il faut rapporter cette valeur de force à la masse du grimpeur.

Au niveau de la mesure du RFD en escalade :

- Etant donné qu'il est analysé lors d'un mouvement volontaire, le taux de développement de la force mesurée est un RFD contractile et non tétanique.
- Dans le cadre de ce travail, il sera évalué un RFD absolu et non rapporté à la force maximale.
- Il est nécessaire de limiter la compliance du dynamomètre, qui en se déformant pourrait absorber une partie de la force produite par le grimpeur.
- Le dynamomètre doit être précis avec un bruit le plus faible possible.
- La calibration doit être faite à 1000 Hz afin d'avoir la plus grande précision, notamment lors du tout début de la contraction musculaire (< 100 ms).

- Concernant l'identification du départ de la contraction musculaire, un débat est toujours d'actualité dans la communauté scientifique. Il est possible de définir un seuil, lié à un pourcentage de la force maximale. Il est également envisageable d'analyser manuellement le départ.
- Il est très important de limiter les pré-tensions agonistes / antagonistes avant le début de l'effort qui pourraient empêcher l'identification du départ de la contraction.
- Le nombre d'essais doit être suffisant. En effet, les coefficients de variations montrent une faible fiabilité du RFD, notamment dans les 100 premières millisecondes.
- Durant les essais, les grimpeurs doivent réaliser une contraction la plus rapide et la plus forte possible. De plus, des encouragements et des feedbacks doivent être réalisés de la part des expérimentateurs.
- Il est possible de calculer différents RFD, en lien avec un pourcentage de la force maximale ou déterminés en fonction d'un temps choisi (50ms, 100ms, 200ms).

Chapitre II : Mise en place d'un test mesurant la force des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que le RFD et effet d'un entrainement spécifique sur une population de haut niveau

Il s'agit dans cette partie de présenter les études n°1 et n°2 réalisées durant ce travail doctoral. Dans un souci de clarté et d'homogénéité, ces articles publiés figurent en annexe sous leurs formes originales (*Annexe 2 et 3)*. Il en est présenté une synthèse afin de lier les études entre elles et de débattre plus facilement concernant les choix méthodologiques ainsi que les résultats. Par conséquent, certaines explications n'ont pas été présentées dans cette partie car elles n'apportent pas d'informations pertinentes dans la réponse aux objectifs. A l'inverse, certaines informations supplémentaires sont présentes afin de mieux développer notre argumentaire. De plus, une étude réalisée à la fin de ce chapitre présente les différences entre les grimpeurs internationaux de bloc et de difficulté. En effet, il apparait fondamental d'analyser les différences et les similitudes chez les sportifs de haut niveau en escalade. Les principaux objectifs de ces travaux sont alors:

- De vérifier la fiabilité et la reproductibilité d'un test mesurant la force maximale et le taux de développement de la force (RFD) des muscles fléchisseurs des doigts.
- D'examiner les différences entre ces indicateurs en fonction des niveaux d'expertise (internationaux ou haut niveau, confirmés et novices).
- D'analyser l'impact d'un entrainement spécifique chez une population de haut niveau en escalade.
- De présenter les différences de la force maximale volontaire et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts entre des grimpeurs internationaux en bloc et en difficulté.

Dans les faits, il s'avère que l'analyse de l'évolution de la force maximale ainsi que le RFD (étude n°1) a été réalisée en premier. Puis, l'étude n°2 a validé la fiabilité et la reproductibilité du test. Il est important de le préciser car il y a eu des évolutions de la démarche méthodologique qui seront détaillées par la suite.

I. Protocole expérimental

Cette partie décrit précisément le protocole expérimental utilisé lors des études 1 et 2. De nombreux liens sont réalisés avec le chapitre précédent, notamment dans la justification de la démarche expérimentale.

I.1. Détails des outils de mesures

I.1.a. Dynamomètre

Un dynamomètre électronique "power grip manipulandum", PGM (SENSIX, biopôle, 4 rue Carol Heitz - 86 000 Poitiers), avec une dimension de 120 * 45 * 25 mm, une masse de 320 g, une sensibilité de 0,166%, étalonné à une fréquence allant de 100 Hz à 1000 Hz, est utilisé. Il fonctionne avec une alimentation de 5 volts et est connecté à l'ordinateur avec une carte d'acquisition. Les données peuvent être traitées par un logiciel spécifique et sont stockées dans un ordinateur.

Lors des deux études, le dynamomètre est bloqué par trois pièces de bois et une sangle qui l'empêche de tomber (cf. figures 27 et 28). Cela n'a néanmoins pas d'incidence sur les mesures enregistrées. La surface de contact entre les doigts et le dynamomètre est de 10 mm × 120 mm. Il ne se déforme pas sous la pression des doigts et respecte donc les exigences présentées précédemment. Enfin, le bruit de l'appareil est au maximum de ± 0,35 N.

I.1.b. Balance à impédance

Des mesures anthropométriques sont réalisées avant chaque test pour l'ensemble des participants à l'aide d'une balance à impédance, «InnerScan», Tanita BC 545n (TANITA, Amsterdam, Pays-Bas). Un courant alternatif de faible intensité, parcourt l'organisme. La distinction entre la masse grasse et la masse maigre est possible en mesurant l'impédance du corps humain. Cette technique, dont le principe repose sur la mesure de la conductivité des différents tissus, permet d'extrapoler la masse corporelle, maigre et grasse. La mesure de la masse corporelle (kg) avec ce type de balance apparaît comme étant fiable. Néanmoins, une étude de 2016 remet en cause la précision de la masse grasse, par rapport à des mesures réalisées avec un scanner DXA (Explorer S/N 91075, Hologic Inc Waltham, USA). Ce dernier est considéré comme étant la référence de l'analyse corporelle (Macfarlane et al., 2016).

I.2. Présentation des groupes expérimentaux et de la procédure

I.2.a. Répartition des groupes et temporalité des études

La première expérimentation concernant les effets d'un entrainement spécifique sur la force maximale et le RFD s'est déroulée entre novembre 2016 et janvier 2017. Les 14 grimpeurs sont répartis de façon aléatoire dans deux groupes appelés le « groupe contrôle », et le « groupe expérimental » ayant suivi un entrainement spécifique de 4 semaines. Les mesures de la force maximale volontaire et du RFD ainsi que les évaluations anthropométriques sont réalisées une première fois avant le début de l'expérimentation et une seconde fois une semaine après la fin du cycle d'entrainement. La figure présentée ci-dessous propose un récapitulatif de la procédure (cf. figure 26).

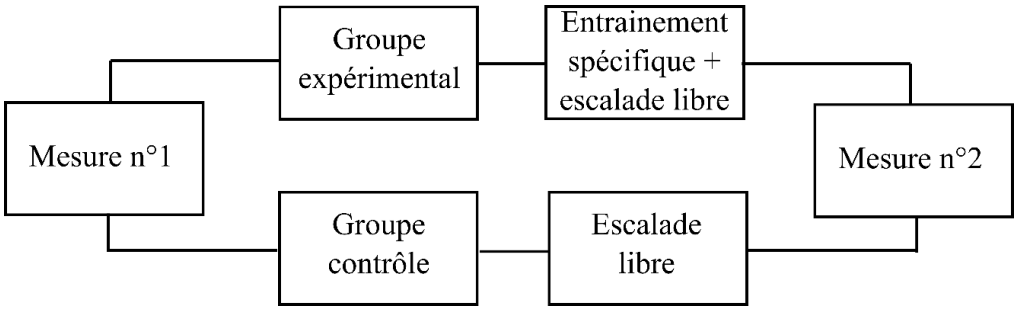


Figure 26 : Déroulement de l'étude n°1

La seconde expérimentation a eu lieu entre avril 2017 et juillet 2017. Afin d'analyser la fiabilité et la reproductibilité, la procédure est réalisée deux fois, espacée de 10 ± 2 jours pour tous les participants de chaque groupe. Les grimpeurs de haut niveau et confirmés ont reçu l'instruction de ne pas réaliser d'entrainement spécifique des membres supérieurs, afin de ne pas biaiser les résultats. La figure ci-dessous présente un récapitulatif de la seconde expérimentation (cf. figure 27).

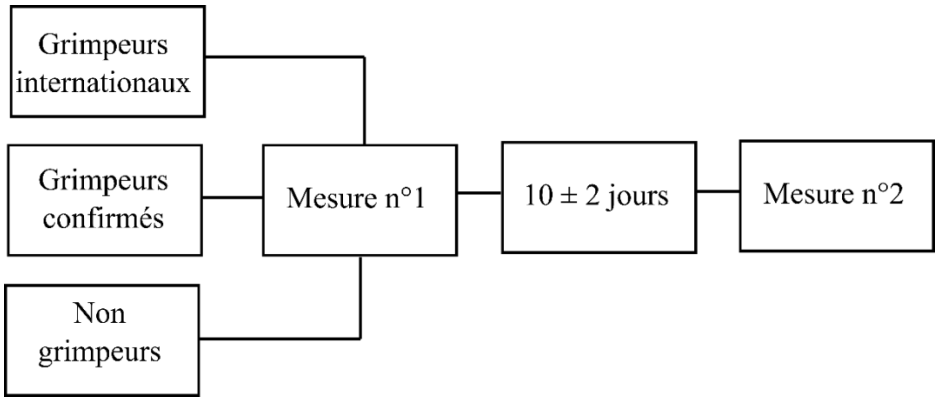


Figure 27 : Déroulement expérimental de l'étude n°2.

I.2.b. Présentation et analyse des groupes

Afin de mettre en lumière les évolutions engendrées à la suite d'un entrainement spécifique, 2 groupes composés de 7 grimpeurs (14 au total) sont recrutés par les entraineurs nationaux de bloc (Nicolas Januel et Rémi Samyn). L'ensemble des grimpeurs participent à des compétitions de niveau international et certains d'entre eux ont réalisé des podiums durant la saison 2015 - 2016.

Puis, afin de vérifier et valider la fiabilité et reproductibilité du test, trois groupes, différenciés au regard de leurs expertises, ont été composés. Un échantillon de 31 participants (12 grimpeurs internationaux / de haut-niveau, 10 grimpeurs confirmés et 9 non grimpeurs) ont participé à cette étude. Le niveau d'expertise de chaque groupe est présenté dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 5).

Groupes	Niveau d'expertise		
	FB	YDS	IRCRA
Internationaux / Haut niveau	8b	5.13d	28
Confirmés	7c à 8a	5.12d à 5.13b	24 à 26
Non grimpeurs	> 5b	> 5.11b	> 15

Tableau 5 : Niveau de chaque groupe en fonction des différents systèmes de cotations (*Annexe 1*)
Fb: Fontainebleau ; YDS: Yosemite Decimal System ; IRCRA: International Rock Climbing Research Association.

Concernant le volume d'entrainement, les grimpeurs de haut niveau doivent s'entrainer au minimum 6 fois par semaine et participer à des compétitions de niveau international (coupes et championnats du monde, coupes et championnats d'Europe). Les grimpeurs de niveau confirmé grimpent 4 fois par semaine. Les non grimpeurs ne doivent pas avoir une pratique régulière de l'escalade. De plus, aucun des participants ne doit avoir souffert de blessures des membres supérieurs durant les 10 derniers mois.

I.3. Détails de la procédure des expérimentations

I.3.a. Lieu de l'expérimentation

Chaque participant doit respecter une période de récupération de 2 jours avant chaque mesure, afin de limiter les effets de la fatigue liée à leur pratique sportive. Les tests ont lieu au pôle France d'escalade dans la salle Karma (Route Militaire, 77300 Fontainebleau).

Les participants réalisent la même séance d'échauffement durant 10 minutes. Puis il s'ensuit une période de 30 minutes au cours de laquelle ils grimpent en commençant par des mouvements de faible intensité et en terminant par des mouvements de très haute intensité. Ils effectuent le test à la même heure de la journée (10h du matin) et au même endroit afin d'éliminer toute influence de la variation circadienne. Les conditions ambiantes ont également été standardisées (20 ± 0,5 °C). Enfin, ils ont 10 minutes pour se familiariser avec le mouvement et le dynamomètre utilisé lors du test.

I.3.b. Posture et position des sujets

Concernant la posture durant le test, les participants mettent une main sur le dynamomètre. L'angle entre le bras et le tronc est de 90 degrés ainsi que l'angle entre le bras et l'avant-bras, dans le plan sagittal. L'angle entre le tronc et le bras est de 20 degrés dans le plan transversal. L'autre bras reste immobile le long du corps (cf. figure 28). La hauteur de l'appareil est ajustée en fonction de la taille de chaque participant. Avant chaque flexion de doigts, un contrôle visuel des angles est réalisé afin de garantir une position standardisée. Les participants peuvent mettre de la magnésie afin d'enlever l'humidité présente sur les mains. Cependant, il leur est demandé de l'essuyer avec un tissu afin d'éviter d'endommager le dynamomètre. Durant l'exercice, il leur est demandé de ne pas réaliser de pré-contraction avant l'effort afin de ne pas biaiser les résultats, notamment dans la mesure du RFD (Maffiuletti et al., 2016). Dans le cas contraire, l'essai n'est pas comptabilisé et ce dernier doit recommencer.



Figure 28 : Présentation de la posture durant l'étude n°1 et n°2.

I.3.c. Choix des préhensions analysées

Trois préhensions sont utilisées durant l'étude n°1, à savoir : la préhension tendue, semi tendue et arquée (cf. figure 29). Ces différentes préhensions ont été présentées et détaillées précédemment. Il est à noter que la préhension arquée n'est pas utilisée dans le travail mené sur la reproductibilité et la fiabilité de l'étude, et ce, afin d'éviter d'éventuelles blessures chez les non grimpeurs. En effet, les poulies A2 et A4 (anneaux qui maintiennent les muscles fléchisseurs profonds et superficiels des doigts) sont soumises à une sollicitation très importante, notamment avec la position du pouce qui permet de bloquer mécaniquement l'index et le majeur (Schöffl et al., 2007).



Figure 29 : Illustration des trois préhensions : tendue (A), semi tendue (B) et arquée (C).

I.3.d. Présentation des essais

Les grimpeurs appliquent une force verticale directement sur le dynamomètre en réalisant une flexion de doigts le plus fort et le plus rapidement possible durant 5 secondes (Maffiuletti et al., 2016). Etant donné que la mesure du RFD est complexe, Maffiuletti et al. (2016) préconisent de faire 5 essais et de sélectionner les trois meilleurs. Néanmoins, dans le cas présent, cela engendre nécessairement une fatigue nerveuse et structurale en raison du nombre important de conditions. Par conséquent, chaque participant a 10 minutes pour s'accoutumer à l'effort et au dynamomètre. Durant ce temps imparti, le grimpeur réalise des flexions de doigts le plus fort et le plus rapidement possible. Il s'en suit une récupération de 10 minutes avant de commencer le test. Puis, il réalise 3 essais par préhension qui sont enregistrés, avec un temps de récupération de 3 minutes entre chaque essai.

I.3.e. Présentation du plan d'entrainement

L'entrainement spécifique du groupe expérimental est conçu en collaboration avec les entraineurs de l'équipe de France de bloc et consiste en une série d'exercices de type isométrique (cf. tableau 6). Les grimpeurs doivent réaliser cet entrainement 2 fois par semaine pendant 4 semaines. Les 4 autres sessions comprennent des séances d'escalade. Le protocole n'a pas modifié le volume d'entrainement entre les deux groupes (6 sessions d'entrainement d'escalade pour le groupe de contrôle).

Nombre de séries : **2** Nombre d'exercices par séries : **6**	
Temps de récupération entre chaque exercice : **3 minutes**	
Préhension	Durée de l'effort
Tendue	4 à 6 secondes
Semi tendue	4 à 6 secondes
Semi tendue	4 à 6 secondes
Tendue	4 à 6 secondes
Semi tendue	4 à 6 secondes
Semi tendue	4 à 6 secondes

Tableau 6 : Détails de l'entrainement spécifique du groupe expérimental.

Concernant l'entrainement spécifique, les grimpeurs sont debout, suspendus à une main sur une petite prise personnalisée avec des lattes de 25 à 6 mm de la marque « 180° » et

de la marque « HRT ». L'autre main reste inactive. La taille de la préhension est choisie individuellement de manière à ce que les athlètes ne puissent pas tenir la prise plus de 6 secondes en gardant un angle de 120 degrés entre le bras et l'avant-bras (cf. figure 30).

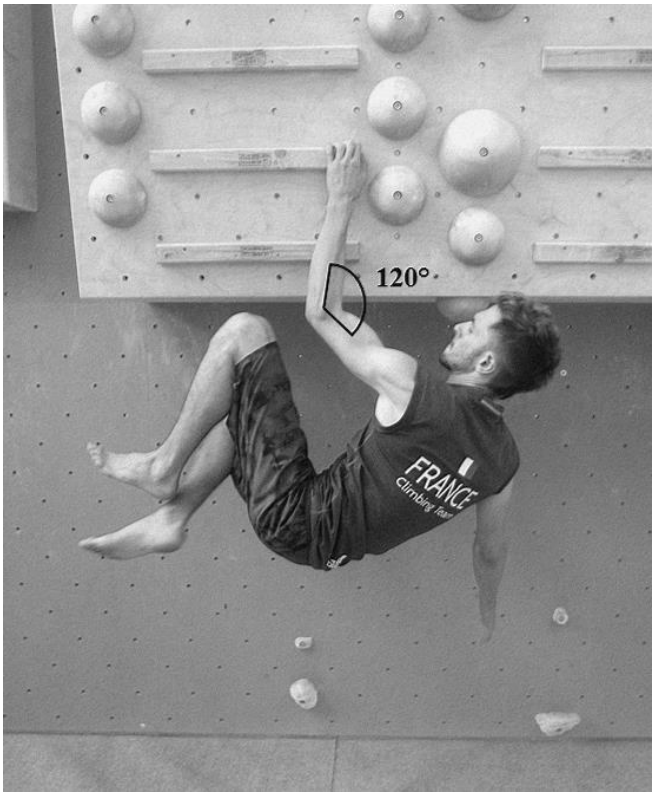


Figure 30 : Illustration de la posture lors de l'entrainement spécifique.

I.4. Méthodologie des paramètres analysés

I.4.a. Choix des paramètres analysés

La force maximale (Fmax) est étudiée en valeur absolue (N) mais également en valeur normalisée, c'est-à-dire divisée par la masse corporelle rapportée en Newton. Le RFD est étudié en valeur absolue (N.s-1).

Etant donné qu'il s'agit d'un mouvement volontaire, il est analysé un RFD contractile. Concernant le choix de mesures du RFD, des modifications entre la première et la seconde étude ont été effectuées. En effet, lors de l'étude n°1, le dynamomètre est réglé à 100 Hz. Or, Maffiuletti et al. (2016) préconisent une calibration à 1000 Hz. Cette différence a un impact important sur les valeurs du RFD sur des temps très courts (50 ms et 100 ms). Afin de limiter un maximum les effets de cette calibration sur la pertinence des résultats, il est choisi

d'analyser un RFD_{200ms} ainsi qu'un $RFD_{95\%}$ (correspondant au taux de développement de la force pour atteindre 95% de la force maximale volontaire).

Dans l'étude n°2, le dynamomètre est réglé à 1000 Hz. De fait, différents RFD, à savoir le RFD_{50ms}, le RFD_{100ms}, RFD_{200ms} et le $RFD_{95\%}$ sont mesurés. La figure présentée ci-dessous illustre ces différents types de RFD (cf. figure 31). Une identification manuelle de départ de la contraction est utilisée comme le préconisent Tillin et al. (2013) avec un seuil fixé à 4 N.

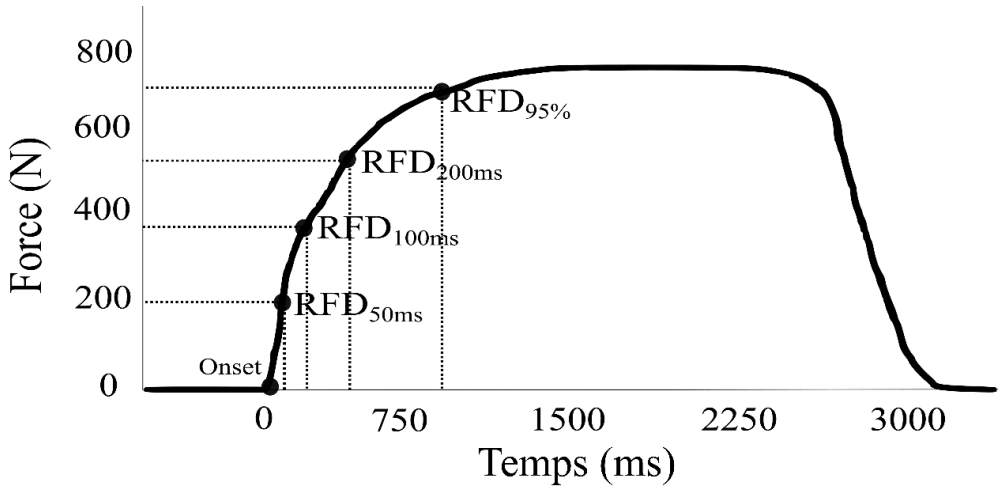


Figure 31 : Illustration des RFD_{50ms}, RFD_{100ms}, RFD_{200ms} et $RFD_{95\%}$ analysés.

I.4.b. Justification des paramètres analysés

Un RFD absolu et non rapporté à la force maximale des athlètes est mesuré, et ce pour plusieurs raisons. Etant donné que la force chez les grimpeurs de haut niveau n'a pas évolué à la suite de l'entrainement, il n'est pas important de rapporter ces valeurs à la FMV. De plus, la force maximale est fortement liée à l'expertise (différence entre les grimpeurs de haut niveau, les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs). Par conséquent, rapporter ce RFD à la force induit nécessairement des différences significatives entre les trois groupes. Or, il s'agit ici de se centrer uniquement sur les différences des RFD.

De plus, étant donné qu'il s'agit d'un mouvement isométrique, les valeurs proches de la force maximale atteignent un plateau. Ensuite, le niveau de force stagne mais peut néanmoins légèrement évoluer en raison de très légères variations de la posture du sujet. Par conséquent, afin de limiter ce biais, il est choisi d'analyser un RFD avant que ce plateau ne soit atteint ($RFD_{95\%}$ et non $RFD_{100\%}$). La figure proposée ci-dessous illustre ce propos (cf.

figure 32). Enfin, le pic du RFD n'est pas utilisé car Maffiuletti et al. (2016) ont montré qu'il s'agit d'un indicateur non fiable.

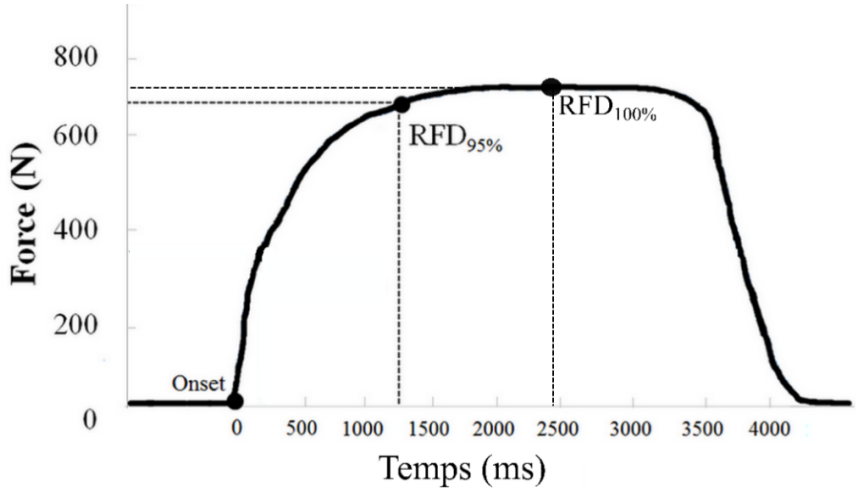


Figure 32 : Différence entre le $RFD_{95\%}$ et le $RFD_{100\%}$.

– Résumé –

Afin de mesurer l'effet d'un entrainement spécifique, deux groupes de 7 grimpeurs de haut niveau sont constitués. Un groupe effectue un entrainement durant 4 semaines alors que l'autre grimpe librement.

Afin d'analyser les différences en fonction du niveau d'expertise, 3 groupes constitués de 31 participants (12 grimpeurs internationaux, 10 grimpeurs confirmés et 9 non grimpeurs) réalisent deux mesures espacées de 10 ± 2 jours.

Une posture bien spécifique est indispensable à conserver lors de chaque essai. Différentes préhensions sont utilisées (tendue, semi tendue et arquée). De plus, seulement 2 préhensions sont conservées dans l'étude de la fiabilité et de la reproductibilité du test, afin d'éviter d'éventuelles blessures chez les non grimpeurs. Pour chaque préhension, 3 essais sont mesurés. Au préalable, les sujets ont 10 minutes pour se familiariser avec le dynamomètre et l'effort demandé. Lors de chaque essai, ils produisent une force verticale la plus importante et la plus rapide possible sur un dynamomètre électronique. Les paramètres mesurés sont la force maximale volontaire absolue et normalisée, ainsi que le RFD_{50ms}, le RFD_{100ms}, le RFD_{200ms} et le $RFD_{95\%}$.

II. Analyses statistiques

La normalité et l'homogénéité de la variance sont vérifiées à l'aide du test Shapiro-Wilk et du test de Brown-Forsythe, Les tests statistiques ont été traités à l'aide du logiciel STATISTICA (version 10, StatSoft, Inc.).

Afin de mesurer les différences entre le groupe expérimental et le groupe contrôle, une analyse de variances à mesure répétée (ANOVA) est effectuée (avant et après entrainement), le groupe étant le facteur inter et l'entrainement, le facteur intra. Lorsque l'ANOVA est significative, un test de post-hoc de Fischer ainsi que la puissance du test (1 - β) sont effectués. Pour toutes les analyses statistiques, le seuil de significativité est fixé à $p < 0,05$ et la taille de l'effet (η^2) a été définie comme petite pour $\eta^2 > 0,01$; moyenne pour $\eta^2 > 0,09$; et large pour $\eta^2 > 0,25$.

- Afin de vérifier la reproductibilité et la fiabilité du test dans la seconde étude, les coefficients de corrélation intra classe (ICC) et les coefficients de variation (CV en%) sont calculés pour les deux sessions, dans chaque condition et pour chaque groupe. Selon Atkinson et Nevill (1998), un ICC supérieur à 0,8 et un CV inférieur à 10% garantissent une excellente fiabilité. De plus, la fiabilité entre les sessions est évaluée à l'aide d'un test T. Trois grimpeurs internationaux sont exclus de cette analyse car ils ont réalisé un entrainement avant la session n°2.

Enfin, pour évaluer la différence entre les trois groupes, une analyse de variance à un facteur (ANOVA), est effectuée. En cas de significativité, un test de post-hoc de Fisher et la puissance du test (1 - β) sont calculés. Seules les valeurs de la force maximale et du RFD de la première session sont conservées pour évaluer cette hypothèse. Certains participants ont la main gauche dominante (2 grimpeurs internationaux, 1 confirmé et 2 non grimpeurs). Par conséquent, la main dominante par rapport à la main non dominante est analysée plutôt que la main droite par rapport à la main gauche

.

III. Résultats expérimentaux et interprétations

Il s'agit dans cette partie de présenter et d'interpréter les résultats issus des deux études. De nombreux liens sont réalisés avec le chapitre précédent afin de discuter des évolutions ou non de la force maximale volontaire et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts.

III.1. Résultats sur la base de facteurs anthropométriques

III.1.a. Résultats

La figure ci-dessous met en lumière la synthèse des données anthropométriques entre les deux études, présentant les spécificités entre chaque groupe (cf. tableau 7). Il existe de nombreuses différences significatives concernant la masse, l'indice de masse corporelle (IMC) et le pourcentage de masse grasse entre les grimpeurs internationaux, les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs ($p < 0,05$). Néanmoins, les résultats montrent une absence de différence au sein des grimpeurs internationaux / de haut niveau. Enfin, dans l'étude n°1, il n'y a pas d'évolution avant ou après entrainement.

		Age (année)	Taille (cm)	IMC (kg/m²)	Masse (S1 ou avant entrainement) (kg)	Masse (S2 ou après entrainement) (kg)	% de matière grasse (S1 ou avant entrainement)	% de matière grasse (S2 ou après entrainement)
Etude n°1	Groupe contrôle	26,1 ± 1,2	173,0 ± 5,0	21,7 ± 1,9	64,5 ± 3,3	64 ± 3,5	9,2 ± 1,4	9,3 ± 1,4
	Groupe expérimental	26,1 ± 3,0	175,9 ± 6,0	20,9 ± 2,1	63,9 ± 3,6	64,2 ± 3,2	8,7 ± 3	9,0 ± 2,5
Etude n°2	Internationaux	24,6 ± 3,6	175,4 ± 5,4	21,2 ± 1,7*	64,8 ± 7,3*	65,7 ± 6,9*	9,5 ± 2,5*	9,8 ± 1,6*
	Confirmés	26,8 ± 7,2	177,3 ± 0,6	20,9 ± 2,1*	65,3 ± 6,2*	66,2 ± 5,1*	9,3 ± 3,7*	10,3 ± 2,1*
	Non grimpeurs	27,2 ± 3,2	178,3 ± 0,9	25,7 ± 4,5	81,4 ± 13,9	83,1 ± 15,5	17,7 ± 7,9	18,9 ± 5.,3

Tableau 7: Synthèse des données anthropométriques des études 1 et 2.

* : Différences significatives entre les grimpeurs internationaux et confirmés par rapport aux non grimpeurs ($p < 0,05$).

III.1.b. Interprétation

Les caractéristiques anthropométriques des grimpeurs internationaux semblent très similaires aux études réalisées précédemment sur des élites. En effet, les grimpeurs de ces

études ont une masse moyenne comprise entre 63,9 ± 3,6 kg et 65,7 ± 6,9 kg avec un pourcentage de matière graisseuse compris entre 8,7 ± 3% et 9,8 ± 1,6%. Ces valeurs sont proches de celles trouvées dans la littérature pour l'escalade, que ce soit pour la masse corporelle [(Watts et al., 2000) ; (López-Rivera et González-Badillo, 2012)] ou pour le pourcentage de matière grasse (Arazi et al., 2018). Ces valeurs sont également proches de celles mis en avant dans le tableau (cf. tableau 4).

Aucune différence significative n'est trouvée entre le groupe expérimental et contrôle (< 1%). En outre, les différences avant et après entrainement sont négligeables (< 1%). Ces résultats permettent d'affirmer que s'il existe une évolution concernant la force normalisée (rapport entre la force et la masse corporelle), cela s'explique par un effet de l'entrainement et non par une variation de la masse des grimpeurs**.**

Enfin, la différence entre les grimpeurs internationaux et les non grimpeurs est très importante (20,39%). Cela peut s'expliquer car la production de force est plus importante lorsque l'intensité des voies et des blocs augmente. Par conséquent, les contraintes au niveau des doigts sont également amplifiées. Moins l'athlète aura une masse importante, moins les contraintes des muscles fléchisseurs des doigts seront élevées.

– Résumé –

Il existe d'importantes différences entre les grimpeurs internationaux, les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs à propos de la masse corporelle et du pourcentage de matière grasse. Cela s'explique notamment par le fait que l'escalade est une activité à poids de corps et que la masse a une incidence importante. Néanmoins, il n'existe pas de différence au sein des grimpeurs internationaux. Ce résultat est très important pour la suite de ce travail, notamment lorsque sera analysée la force maximale normalisée.

III.2. Résultats sur la fiabilité et la reproductibilité de l'étude n°2

III.2.a. Résultats

Concernant les valeurs de la force maximale volontaire, préhensions confondues, les grimpeurs de haut niveau présentent des valeurs comprises entre 548,08 ± 77,95 N et 567,26 ± 70,45 N ; les grimpeurs confirmés entre 414,85 ± 51,82 N et 452,11 ± 44,79 N et les non grimpeurs entre 258,91 ± 54,19 N et 268,96 ± 48,41 N.

A propos du RFD_{50ms}, la moyenne des valeurs est de 1186,44 ± 813,01 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs de haut niveau, 926,61 ± 563,58 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs confirmés et 671,55 ± 297,18 $N.s^{-1}$ pour les non grimpeurs. Pour le RFD_{100ms}, la moyenne des valeurs est de 1396,55 ± 717,51 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs de haut niveau, 1338,94 ± 588,23 $N.s^{-1}$ pour les confirmés et 776,32 ± 295,15 $N.s^{-1}$ pour les non grimpeurs. L'étude du RFD_{200ms} révèle une moyenne de 1329,29 ± 431,28 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs internationaux, 1003,48 ± 346,19 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs confirmés et 661,88 ± 206,56 $N.s^{-1}$ pour les non grimpeurs. Enfin le $RFD_{95\%}$ montre une moyenne des valeurs de 570,1 ± 203,5 $N.s^{-1}$ pour les grimpeurs de haut niveau, 312,54 ± 147,86 $N.s^{-1}$ pour les confirmés et 244,87 ± 138,4 $N.s^{-1}$ pour les non grimpeurs.

La fiabilité intra-session révèle des ICC moyens pour la force maximale variant de 0,95 à 0,98 pour les grimpeurs internationaux, de 0,94 à 0,99 pour les grimpeurs confirmés et de 0,89 à 0,92 pour les non grimpeurs. Les CV varient entre 2,90% et 4,33% pour les internationaux, de 2,64% à 5,93% pour les confirmés et entre 5,46% et 9,99% pour les non grimpeurs.

Les valeurs de RFD révèlent des ICC moyens allant de 0,74 à 0,90 pour les grimpeurs internationaux, de 0,58 à 0,98 pour les grimpeurs confirmés et de 0,40 à 0,91 pour les non-grimpeurs. Les CV varient entre 7,77% et 16,22% pour les grimpeurs internationaux, entre 9,83% et 28,34% pour les grimpeurs confirmés et entre 12,56% et 25,44% pour les non grimpeurs.

La fiabilité entre les sessions n'a révélé aucune différence**.** Le tableau ci-dessous présente les résultats concernant la reproductibilité et la fiabilité de l'étude (cf. tableau 8).

	Session 1				Session 2			
	Tendue		Semi tendue		Tendue		Semi tendue	
	CV	ICC	CV	ICC	CV	ICC	CV	ICC
Internationaux								
RFD_{50ms}	11,52	0,87	10,45	0,79	12,18	0,88	11,43	0,78
RFD_{100ms}	13,21	0,84	12,40	0,81	15,75	0,84	14,46	0,77
RFD_{200ms}	7,77	0,90	10,60	0,87	12,36	0,89	9,89	0,81
$RFD_{95\%}$	12,63	0,76	12,56	0,76	15,03	0,83	16,22	0,74
Fmax	3,97	0,98	3,56	0,97	2,90	0,98	4,33	0,95
Confirmés								
RFD_{50ms}	19,70	0,89	10,03	0,69	20,50	0,79	15,55	0,60
RFD_{100ms}	18,20	0,72	9,83	0,67	13,51	0,58	14,74	0,67
RFD_{200ms}	12,94	0,80	10,17	0,98	15,99	0,87	10,51	0,76
$RFD_{95\%}$	16,34	0,73	15,17	0,65	28,34	0,73	17,17	0,75
Fmax	5,93	0,96	2,64	0,96	3,98	0,99	3,92	0,94
Non grimpeurs								
RFD_{50ms}	15,57	0,66	21,01	0,74	18,52	0,60	15,32	0,85
RFD_{100ms}	15,63	0,80	13,45	0,45	16,96	0,60	18,83	0,59
RFD_{200ms}	16,08	0,60	12,56	0,91	14,91	0,65	13,80	0,78
$RFD_{95\%}$	23,83	0,74	25,44	0,70	18,52	0,40	24,16	0,55
Fmax	9,99	0,92	5,61	0,90	5,46	0,91	6,42	0,89

Tableau 8: Récapitulatif des valeurs des ICC et CV en fonction de la session pour chaque groupe.

III.2.b. Interprétation

A propos de la force maximale :

L'ensemble des valeurs révèle donc une bonne fiabilité et une bonne reproductibilité du test dans l'analyse de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts (Atkinson et Nevill, 1998).

Cette fiabilité élevée peut s'expliquer par le fait que la force maximale est la résultante de l'expression de nombreux facteurs (structural, nerveux, métabolique), indépendamment du temps et par conséquent, plus stable dans le temps. L'entrainement engendre des évolutions du facteur nerveux ayant comme conséquence une évolution de la force maximale. Néanmoins, durant une même session, cette force maximale sera principalement dépendante du nombre de fibres musculaires finales recrutées ainsi que de la surface de la section transversale (Cohen et al., 2015). De plus, la comparaison entre les valeurs des grimpeurs internationaux et les valeurs mises en avant dans la littérature montrent qu'elles sont similaires avec une différence de 5% [(Fanchini et al., 2013) ; (Macdonald et Callender, 2011)].

Etant donné les bons résultats de la fiabilité, couplés au fait qu'il n'y ait pas d'évolution entre les deux sessions, il est possible de conclure que ce test est fiable dans l'analyse de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts. De plus, les valeurs mesurées sont proches de celles mises en avant dans la littérature, il apparaît donc que le test est également reproductible.

A propos du RFD :

Lorsque le RFD est analysé, les résultats montrent une augmentation des valeurs d'ICC avec le niveau d'expertise. En effet, les ICC sont excellents pour les grimpeurs internationaux (0,74 à 0,90), bons et excellents pour les grimpeurs confirmés (entre 0,58 et 0,98). Une étude de 2013 montre des valeurs comparables (0,74 à 0,96) pour le RFD (Tillin et al., 2013a). Pour les non grimpeurs, la disparité des valeurs des ICC est plus importante (entre 0,40 et 0,91).

Les coefficients de variations moyens pour l'ensemble des conditions sont de 17,78% chez les non grimpeurs contre 12,40% chez les internationaux. Ces valeurs sont en accord avec celles montrées dans la littérature (Buckthorpe et al., 2012). Cela suppose donc que les grimpeurs internationaux sont en mesure de reproduire de façon plus stable une installation de la force au fil du temps. Cela peut s'expliquer notamment par l'effet de l'entrainement sur le recrutement des unités motrices (Van Cutsem et Duchateau, 2005). En escalade, le grimpeur doit, dans un cours laps de temps, réguler sa posture en produisant de la force rapidement, afin d'éviter de chuter, notamment lors de mouvements dynamiques. Cela peut donc expliquer la différence entre les grimpeurs internationaux et les non grimpeurs.

En s'intéressant aux différents taux de développement de la force, le RFD_{200ms} semble être plus fiable que les autres mesures du RFD. Cette étude révèle une moyenne des CV de 15,15% pour le RFD_{50ms} et de 12,29% pour le RFD_{200ms}, ce qui a déjà été montré (Tillin et al., 2013a). Dans son étude, Tillin et al. (2013) montrent que le RFD_{200ms} est également plus stable que le RFD_{50ms} (CV = 14,6% pour le RFD_{50ms} contre 7,9% pour le RFD_{200ms}). Une étude de Folland et al. (2014) indique également une baisse des coefficients de variations en fonction du temps lors de contractions isométriques (48% à 50 ms et 23% à 150 ms).

Enfin, en analysant les résultats du $RFD_{95\%}$ (CV compris entre 12,56% et 28,34%), il apparaît que ce facteur est instable. Cela révèle qu'atteindre le plus rapidement 95% de la force maximale implique de nombreuses différences intra individuelles.

En conclusion, il semble que le RFD soit un paramètre biomécanique très variable notamment au début de la phase d'installation de la force. Cela peut être dû au bruit du dynamomètre utilisé (± 0,35 N) ou encore à des différences inter et intra individuelles importantes. Il apparaît néanmoins que le RFD_{200ms} est le paramètre le plus stable.

- Résumé -

L'étude de la fiabilité de la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts révèle des résultats solides. De plus il n'y a pas de variation de ces valeurs entre les deux sessions garantissant une bonne reproductibilité.

Le RFD_{50ms}, le RFD_{100ms} et le $RFD_{95\%}$ apparaissent comme étant instables. Néanmoins, plus le niveau d'expertise des grimpeurs est élevé, plus le RFD devient stable. Le RFD_{200ms} apparaît comme étant l'indicateur le plus fiable à analyser.

III.3. Résultats sur la force maximale absolue et normalisée

III.3.a. Résultats

Il existe une différence significative entre les grimpeurs internationaux, les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs. Le test post-hoc de Fisher révèle une différence entre chaque groupe ($p < 0,001$). Les résultats sont présentés ci-dessous (cf. tableau 9).

			Internationaux	Confirmés	Non-grimpeurs	η^2
Fmax absolue	Tendue	Dominante	559 ± 71 § ϕ	443 ± 67 *	268 ± 48	0,79
		Non dominante	554 ± 75 § ϕ	415 ± 52 *	258 ± 54	0,81
	Semi tendue	Dominante	567 ± 70 § ϕ	439 ± 53 *	267 ± 43	0,83
		Non dominante	548 ± 778 § ϕ	452 ± 45 *	266 ± 55	0,78
Fmax normalisée	Tendue	Dominante	0,88 ± 0,09 § ϕ	0,68 ± 0,13 *	0,35 ± 0,10	0,82
		Non dominante	0,88 ± 0,12 § ϕ	0,65 ± 0,10 *	0,34 ± 0,11	0,81
	Semi tendue	Dominante	0,90 ± 0,11 § ϕ	0,69 ± 0,10 *	0,35 ± 0,09	0,84
		Non dominante	0,87 ± 0,10 § ϕ	0,72 ± 0,10 *	0,35 ± 0,13	0,80

Tableau 9: Résultats de la force maximale absolue (N) et normalisée entre les grimpeurs internationaux, confirmés et les non grimpeurs

§ : Différence significative entre les grimpeurs internationaux et confirmés

ϕ: Différence significative entre les grimpeurs internationaux et les non grimpeurs

* : Différence significative entre les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs

L'étude sur l'effet d'un entrainement spécifique ne révèle pas de différence significative entre le groupe expérimental et le groupe contrôle lorsque les valeurs de la force maximale sont exprimées en absolu (cf. tableau 10). Toutefois, concernant la valeur normalisée, il y a un effet significatif sur la préhension tendue droite ($F(1.12) = 7,56$; $p = 0,02$; $\eta^2 = 0,38$ et $\beta = 0,71$). Le test post-hoc de Fisher révèle un effet de l'entrainement pour le groupe expérimental ($p = 0,03$) ; ainsi qu'une différence significative entre ce dernier et le groupe contrôle ($p=0,02$) lors de la mesure 2.

		Groupe contrôle			Groupe expérimental		
		Avant entrainement	Après entrainement	Différence (%)	Avant entrainement	Après entrainement	Différence (%)
Fmax absolue	Tendue G	459 ± 63	469 ± 59	2,0	522 ± 36	567 ± 64	7,9
	Semi tendue G	469 ± 62	472 ± 70	0,8	518 ± 51	548 ± 55	5,6
	Arquée G	416 ± 84	412 ± 91	-0,9	506 ± 41	536 ± 34	5,7
	Tendue D	477 ± 74	449 ± 85	- 6,3	509 ± 51	548 ± 69	7
	Semi tendue D	485 ± 67	468 ± 47	- 3,7	517 ± 65	551 ± 52	6,2
	Arquée D	449 ± 76	435 ± 105	- 3,3	508 ± 44	535 ± 38	5,1
Fmax normalisée	Tendue G	0,72 ± 0,05	0,75 ± 0,06	4	0,83 ± 0,05	0,91 ± 0,06	8,8
	Semi tendue G	0,74 ± 0,05	0,75 ± 0,06	1,4	0,83 ± 0,05	0,88 ± 0,06	5,7
	Arquée G	0,65 ± 0,07	0,66 ± 0,8	1,6	0,82 ± 0,07	0,87 ± 0,08	5,7
	Tendue D	0,75 ± 0,05	0,71 ± 0,07	- 5,6	0,82 ± 0,05	0,88 ± 0,07	6,9*
	Semi tendue D	0,76 ± 0,05	0,75 ± 0,05	- 1,3	0,83 ± 0,06	0,89 ± 0,06	5,7
	Arquée D	0,71 ± 0,08	0,69 ± 0,08	- 2,7	0,82 ± 0,09	0,87 ± 0,08	5,8

Tableau 10 : Résultats de la force maximale absolue (N) et normalisée entre le groupe contrôle et expérimental.

* : Différence significative entre le groupe expérimental et le groupe contrôle ($p < 0.05$).

III.3.b. Discussion

<u>Différences de la force maximale entre les trois groupes</u> :

Au regard des différences entre les grimpeurs internationaux, confirmés et les non grimpeurs concernant la force maximale absolue et normalisée, il en ressort une différence significative pour toutes les conditions quelle que soit la main (différence moyenne de 22,11% entre les grimpeurs internationaux et confirmés et de 38,58% entre les confirmés et les non-grimpeurs pour la force maximale absolue). Une telle différence a été montrée dans de précédentes études (Laffaye et al., 2016). Ces résultats révèlent bien que la force maximale des doigts est effectivement une variable clé dans la performance en escalade comme le soutiennent de nombreux auteurs dans la littérature.

Une meilleure synergie entre les différents muscles permettant à la fois la flexion de doigts mais également la posture, peut expliquer la différence concernant la force produite

(Kristiansen et al., 2015). Enfin étant donné que les grimpeurs de haut niveau ont un volume de pratique très important, il est possible de supposer que des évolutions du facteur structural expliquent ces différences au niveau de la force maximale produite. Aagaard et al. (2001) montrent qu'un entrainement intensif engendre une augmentation significative du PCSA (77,5 ± 3,0 cm² contre 85,0 ± 2,7 cm² après entrainement) ainsi que de l'angle de pennation (8,0 ± 0,4 degrés contre 10,7 ± 0,6 degrés après entrainement) (Aagaard et al., 2001). Parallèlement, la force isométrique du quadriceps augmente de 282,6 ± 11,7 to 327,0 ± 12,4 N.m. Aagaard et al. (2001) expliquent que « les résultats suggèrent que la morphologie, l'architecture et les propriétés contractiles d'un muscle humain in vivo sont interdépendantes. Ces interactions semblent induire des adaptations spécifiques ». (Aagaard et al., 2001). Néanmoins, la répartition des fibres de type I et II reste inchangée à la suite de l'entrainement. Par conséquent, si les proportions des fibres de types II ont une incidence sur la force développée, il apparaît que ces proportions n'évoluent pas.

Différences en fonction de l'entrainement spécifique :

D'une part, il est à noter une absence d'évolution pour le groupe contrôle. D'autre part, une seule condition (tendue droit) révèle un gain significatif (+ 8%) pour le groupe expérimental (0,82 ± 0,05 contre 0,88 ± 0,07). Ces résultats sont comparables à ceux fournis lors d'une précédente étude qui s'est intéressée à des grimpeurs confirmés. En effet, 4 semaines d'entrainement ont engendré un gain de 5% pour la préhension semi tendue (Fanchini et al., 2013). Pendant les modalités d'entrainement, les grimpeurs doivent faire des suspensions sur une prise qu'ils doivent tenir en préhension tendue, ce qui peut expliquer le gain significatif obtenu dans la même condition. De plus, il existe un gain de 5,3% et 7,5% pour les préhensions arquées et semi tendues malgré une absence de différence significative. Cela peut néanmoins révéler un transfert possible de la production de force entre les trois conditions.

Cette limitation des effets sur certains types de préhensions peut s'expliquer par plusieurs raisons. Il est possible de formuler l'hypothèse que la durée entre la fin de l'entrainement et la seconde mesure ne soit pas suffisante pour pouvoir constater les effets

d'une surcompensation[5] (Cometti et Joly, 1989). De plus, on peut supposer qu'une stimulation plus importante soit nécessaire, étant donné qu'il s'agit de grimpeurs de haut niveau ayant déjà réalisé plusieurs cycles d'entrainements de ce type. Un ouvrage démontre qu'il y aurait un état de stagnation lors d'efforts isométriques répétitifs et que d'autres sollicitations seraient nécessaires (Weineck, 1997).

De plus, une étude de 2012 montre d'importantes différences au niveau de la force produite entre la préhension semi tendue et arquée (546,2 ± 40.9 N en arquée contre 490,1 ± 41,6 N) (Amca et al., 2012). Or dans notre étude, les résultats concernant le groupe expérimental, avant entrainement, révèlent une force maximale volontaire de 517 ± 57,5 N en semi tendue et 507 ± 41,5 N en arquée. Cette absence de différence entre les deux préhensions, contredisant la littérature, peut s'expliquer par le fait que de nombreux grimpeurs de l'équipe de France préfèrent les préhensions tendues et semi tendues par peur de blessures en préhension arquée (Hochholzer et al., 2012). En effet, en préhension arquée, les poulies A2 et A4 sont soumises à une pression très importante, due notamment à la position du pouce. Une étude de 2006 montre qu'en préhension arquée, les poulies A2 et A4 reçoivent respectivement une contrainte de 254,8 N et de 220,9 N pour une force externe de 95,6 N. A l'inverse, en préhension tendue, la tension est beaucoup plus faible (57,4 N pour la poulie A4 et 8,1 N pour la poulie A2, pour force externe égale). De plus, en préhension arquée, à 25 % de la force maximale, les poulies A2 sont soumises à 3 fois plus de pressions (Schweizer, 2001). Ces deux études nous montrent bien la relation entre la force externe produite et la tension exercée au niveau des poulies A2 et A4. Nos résultats suggèrent des valeurs de 505 N développées par le grimpeur en préhension arquée. En accord avec les valeurs présentées par les précédentes études, les poulies A2 et A4 reçoivent bien une pression très importante et pourraient endommager les structures anatomiques passives. Il apparaît donc évident que les grimpeurs utilisent prioritairement à l'entrainement les préhensions tendues et semi tendues plutôt qu'arquées.

Il est possible de conclure que ce test met en avant d'importantes différences entre les 3 groupes. En outre, malgré un gain pour la préhension tendue, un entrainement de 4 semaines ne semble pas suffisant pour mesurer une évolution significative chez une population de haut

[5] Il s'agit d'un mécanisme de réadaptation qui permet, à la suite d'une période de récupération, de générer un plus haut niveau de force.

niveau en escalade. Il serait intéressant de voir si un entrainement plus long (6 semaines par exemple) engendrerait une évolution concernant la force maximale, comme le montrent certains auteurs tels que Duchateau et Hainaut (1984). .

– Résumé –

Des différences importantes sont mises en avant entre les grimpeurs internationaux, les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs que ce soit au sujet de la force absolue ou de la force normalisée pour toutes les préhensions et quel que soit la main. La force maximale des muscles fléchisseurs est donc bien discriminante du niveau d'expertise. De plus, les valeurs mesurées étant proches de celles de la littérature existante, cela confirme effectivement que ce test mesure bien la force des muscles fléchisseurs des doigts. S'il n'y a pas eu d'évolution pour le groupe contrôle, une seule préhension présente une différence significative après un entrainement spécifique. Cela révèle qu'un cycle de 4 semaines ne serait pas suffisant pour engendrer un gain significatif chez une population de sportifs de haut niveau.

III.4. Résultats sur le RFD

III.4.a. Influence des niveaux d'expertises sur le RFD

Une absence de différence est trouvée pour le RFD_{50ms}, contrairement aux RFD_{100ms}, RFD_{200ms} et $RFD_{95\%}$. L'ensemble de ces résultats est présenté dans le graphique et le tableau ci-dessous (cf. figure 33 et tableau 11).

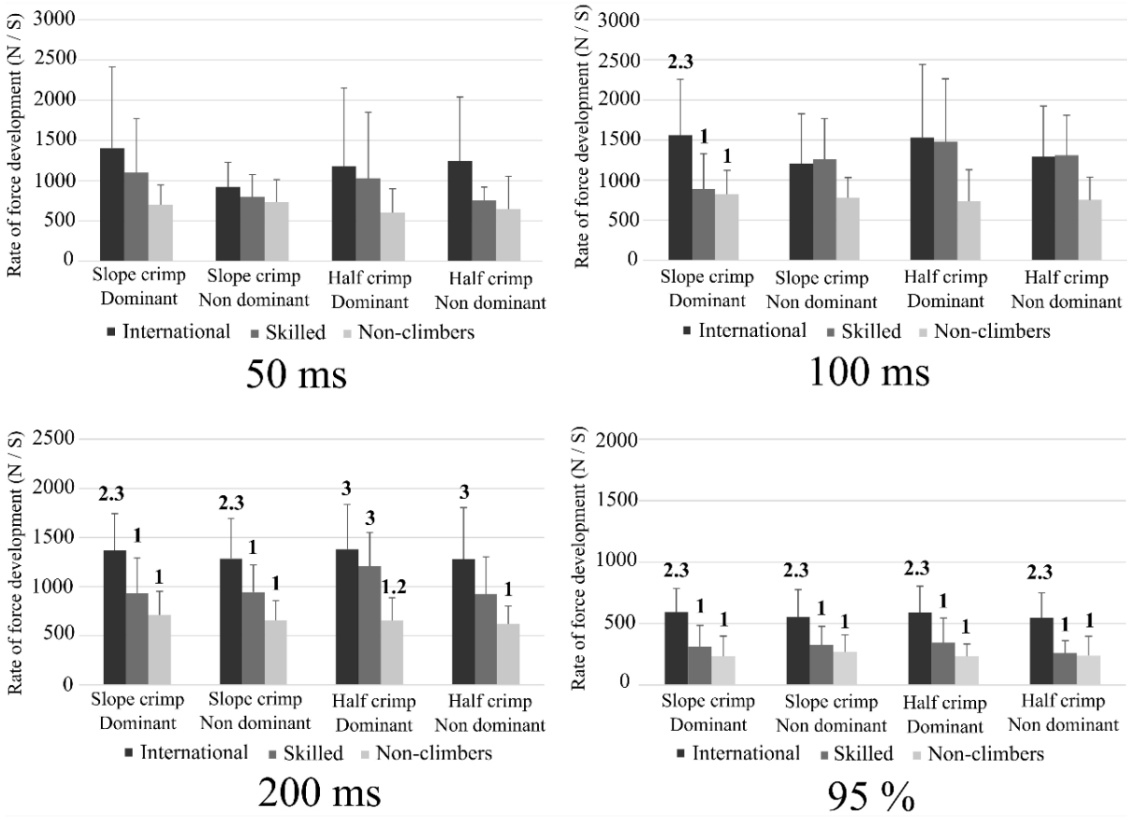


Figure 33 : Différences des valeurs du RFD en fonction des trois groupes

1, 2, 3 : correspondent aux résultats du test de post hoc de Fisher ($p < 0.05$) ; NS : Non significatif.

		RFD_{50ms}	RFD_{100ms}	RFD_{200ms}	$RFD_{95\%}$
Tendue	Dominant	NS	$F(2.28) = 6,37$; $p = 0,005$ $\eta^2 = 0,32$; $\beta = 0,86$	$F(2.28) = 10,58$; $p = 0,001$ $\eta^2 = 0,43$; $\beta = 0,97$	$F(2.28) = 12,22$; $p = 0,001$ $\eta^2 = 0,47$; $\beta = 0,99$
	Non dominant	NS	NS	$F(2.28) = 10,09$; $p < 0,001$ $\eta^2 = 0.35$; $\beta = 0,97$	$F(2.28) = 7,27$; $p = 0,003$ $\eta^2 = 0,35$; $\beta = 0,91$
Semi tendue	Dominant	NS	NS	$F(2.28) = 8,51$; $p = 0,002$ $\eta^2 = 0,40$; $\beta = 0,94$	$F(2.28) = 9,02$; $p < 0,001$ $\eta^2 = 0,42$; $\beta = 0,96$
	Non dominant	NS	NS	$F(2.28) = 6,89$; $p = 0,004$ $\eta^2 = 0,35$; $\beta = 0,89$	$F(2.28) = 11,03$; $p < 0,001$ $\eta^2 = 0,46$; $\beta = 0,98$

Tableau 11 : Différences des valeurs du RFD en fonction des trois groupes.

NS : Non significatif

Interprétation et discussion :

Une très récente étude de 2019 a analysé la différence au niveau du RFD entre des grimpeurs de difficulté et de bloc (Stien et al., 2019). Néanmoins, les auteurs s'intéressent à un niveau d'expertise faible (entre 6b et 7a cotation Fb) ; les valeurs étant difficilement comparables avec les nôtres. De plus, cette étude s'est centrée uniquement sur le pic de RFD, révélant donc certaines limites comme évoquées dans la partie protocole. A notre connaissance, seulement une seule étude s'est intéressée à l'évolution du RFD sur les muscles fléchisseurs des doigts lors de contractions isométriques en escalade chez des sportifs élites (Fanchini et al., 2013). Dans cette étude, les auteurs présentent des valeurs normalisées de 48 ± 18 $N.s^{-1}.kg^{-1}$ pour la préhension arquée. Après standardisation des unités, les grimpeurs produisent alors 3300 N ± 1200 $N.s^{-1}$ en préhension arquée. Toutefois, dans cette étude, le RFD est calculé à sa valeur maximale dans la pente d'installation de la force. Par conséquent, ces valeurs ne peuvent pas être comparables à celle présentées précédemment, que ce soit pour le RFD_{200ms} ou pour le $RFD_{95\%}$. Les études analysant un RFD contractile montrent que le pic du RFD n'apporte pas des informations pertinentes. En effet, ce paramètre se centre uniquement sur une partie très spécifique de la courbe, étant alors très sensible aux variations (Maffiuletti et al., 2016). C'est pourquoi, son utilisation n'est pas recommandée dans des actions fonctionnelles, comme en escalade. Il est alors plus pertinent d'étudier l'évolution de la force sur un temps donné comme nous l'avons fait ; en analysant l'installation de la force durant les 200 premières millisecondes et jusqu'à atteindre un plateau situé à 95% de la force maximale; et ce afin d'avoir l'interprétation la plus juste possible.

Le RFD_{50ms} n'a montré aucune différence significative entre les groupes. Cela peut s'expliquer par la variabilité inter sujet, due à la forte contribution nerveuse au cours de cette phase d'installation de la force. Le fait que ce facteur ne soit pas stable et sujet à une trop grande variation, peut expliquer cette absence de différence entre les groupes. Le RFD_{50ms} ne semble donc pas être discriminant du niveau en escalade. Néanmoins, d'autres études présentent des différences significatives entres des athlètes et des non sportifs (Tillin et al., 2010). Cela pourrait s'expliquer par une différence du groupe musculaire analysé, ainsi que du régime de la contraction (concentrique ou isométrique).

Le RFD_{100ms} révèle une différence de 11,61% entre les internationaux et les confirmés, de 37,11% entre les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs et de 44,41% entre les internationaux et les non grimpeurs. Ce temps d'installation de la force au cours de la tâche

isométrique est influencé par le facteur nerveux, notamment par la décharge des unités motrices (Tillin et al., 2010).

Des différences ont été observées pour les RFD_{200ms} pour l'ensemble des conditions, avec une moyenne de différence de 24,51% entre internationaux et grimpeurs confirmés, 34,04% entre non grimpeurs et confirmés, et 50,21% entre internationaux et non grimpeurs. Andersen et Aagaard (2006) expliquent que le RFD entre 150 et 250 ms dépend à la fois des propriétés contractiles du complexe tendon-muscle (comme la surface de la section transversale) et à la fois du facteur nerveux (décharge des unités motrices). Une corrélation supplémentaire entre la FMV et le RFD révèle un r^2 de 0,61 pour le RFD_{200ms}. La force maximale est liée à la surface de la section transversale musculaire (Cohen et al., 2015). Ce lien entre architecture musculaire et RFD est confirmé par une étude récente qui a montré une corrélation entre la force explosive lors d'une durée de 150 ms et la contraction volontaire maximale ($r^2 = 0,95$) (Folland et al., 2014). De plus, une étude de 2006 révèle que le RFD_{200ms} est également corrélé à la FMV (cf. figure 34) (Andersen et Aagaard, 2006).

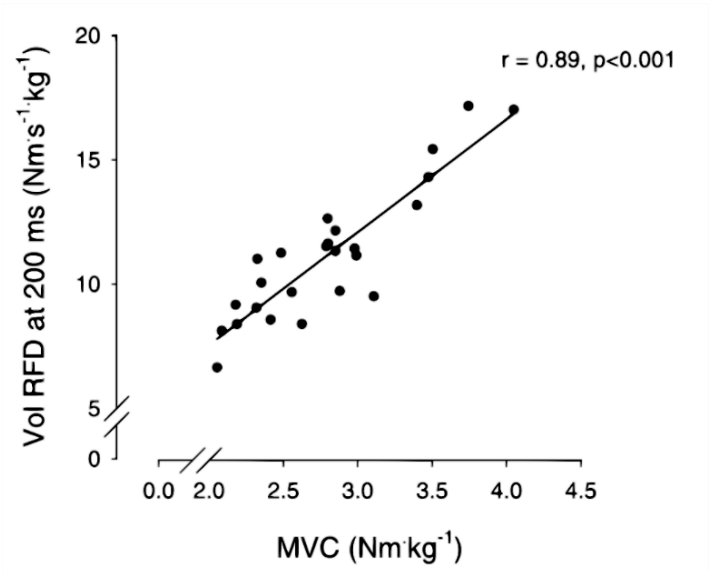


Figure 34 : Relation entre RFD_{200ms} ($Nm.s^{-1}.kg^{-1}$) et MVC (FMV) ($Nm.Kg^{-1}$).
(Andersen et Aagaard, 2006)

La pratique intensive de l'escalade semble donc avoir un impact sur de nombreux facteurs, à savoir la décharge des unités motrices, l'architecture du muscle. Il serait intéressant d'analyser plus spécifiquement la raideur musculo-tendineuse intrinsèque.

Pour le $RFD_{95\%}$, une moyenne des différences de 45,18% entre les internationaux et les grimpeurs confirmés et de 57,05% entre les internationaux et le non grimpeurs est observée. Cela signifie que les grimpeurs internationaux peuvent atteindre 95% de leur force maximale plus rapidement que les autres groupes. Cette valeur est deux fois plus grande chez les grimpeurs internationaux que chez les grimpeurs confirmés et les non grimpeurs. Cela peut s'expliquer par une meilleure adaptation dans une large variété de mouvements, tels que les jetés ou les mouvements dynamiques, incluant des mouvements d'adaptation posturale. Néanmoins, ce facteur étant très instable il est difficile de l'interpréter et de montrer qu'il s'agit d'un facteur discriminant de très haute performance.

III.4.b. Evolution du RFD avant et après entrainement

Concernant le groupe expérimental, la moyenne des valeurs du $RFD_{95\%}$ est de 379,66 ± 182 $N.s^{-1}$ avant entrainement et 398,87 ± 161,92 $N.s^{-1}$ après entrainement pour la préhension arquée ; 342,12 ± 150,15 $N.s^{-1}$ et 423,41 ± 195,93 $N.s^{-1}$ pour la préhension tendue ; 343,92 ± 150,30 $N.s^{-1}$ et 414,74 ± 138,86 $N.s^{-1}$ pour la préhension semi tendue. Pour le groupe contrôle, la moyenne des valeurs est de 294,4 ±162,45 $N.s^{-1}$ avant entrainement et 322,89 ± 182,60 $N.s^{-1}$ après entrainement pour la préhension arquée ; 367,04 ± 240,60 $N.s^{-1}$ et 377,44 ± 240,65 $N.s^{-1}$ en tendue ; 357,70 ± 142,27 $N.s^{-1}$ et 305,89 ± 125,66 $N.s^{-1}$ pour la préhension semi tendue. Il n'y a pas de différence significative au niveau du $RFD_{95\%}$ entre le groupe expérimental et le groupe contrôle. Concernant le RFD_{200ms}, des différences significatives ont été trouvées pour l'ensemble des préhensions. L'ensemble des résultats est présenté dans les graphiques et tableaux ci-dessous (cf. figure 35, tableau 12 et 13).

Aucune différence n'est révélée pour le $RFD_{95\%}$ et le RFD_{200ms} entre le groupe contrôle et le groupe expérimental avant l'entrainement.

	Groupe expérimental			Groupe contrôle		
	Avant entrainement	Après entrainement	Différence (%)	Avant entrainement	Après entrainement	Différence (%)
Tendue gauche	942 ± 315	1408 ± 259	**33,1***	1161 ± 464	1157 ± 335	**<1**
Tendue droit	978 ± 488	1413 ± 514	**30,9***	1225 ± 465	1168 ± 374	**-4,2**
Semi tendue gauche	979 ± 364	1305 ± 491	**25,0***	1177 ± 442	1158 ± 460	**<1**
Semi tendue droit	996 ± 446	1419 ± 511	**29,9***	1215 ± 436	1143 ± 445	**-6,3**
Arquée gauche	984 ± 406	1387 ± 429	**30,1***	742 ± 328	851 ± 323	**13,1**
Arquée droit	1012 ± 514	1367± 407	**26,0***	1107 ± 540	1113 ± 545	**<1**

Tableau 12 : Moyenne des valeurs des RFD_{200ms} ($N.s^{-1}$) entre la mesure 1 et 2 pour le groupe contrôle et expérimental.

* : différences significatives ($p < 0.05$).

Préhensions	Résultats Anova	η^2	β
Tendue gauche	F (1.12) =10,13 ; p = **0,008**	0,46	0,83
Tendue droit	F (1.12) = 9,62 ; p = **0,009**	0,44	0,81
Semi tendue gauche	F (1.12) = 10,18 ; p = **0,006**	0,47	0,85
Semi tendue droit	F (1.12) = 11,18 ; p = **0,006**	0,48	0,86
Arquée gauche	F (1.12) = 6,39 ; p = **0,026**	0,35	0,64
Arquée droit	F (1.12) = 7,36 ; p = **0,02**	0,38	0,70

Tableau 13: Résultats du test de l'Anova à mesure répétée pour le groupe expérimental avec la puissance (β) et la taille de l'effet (η^2).

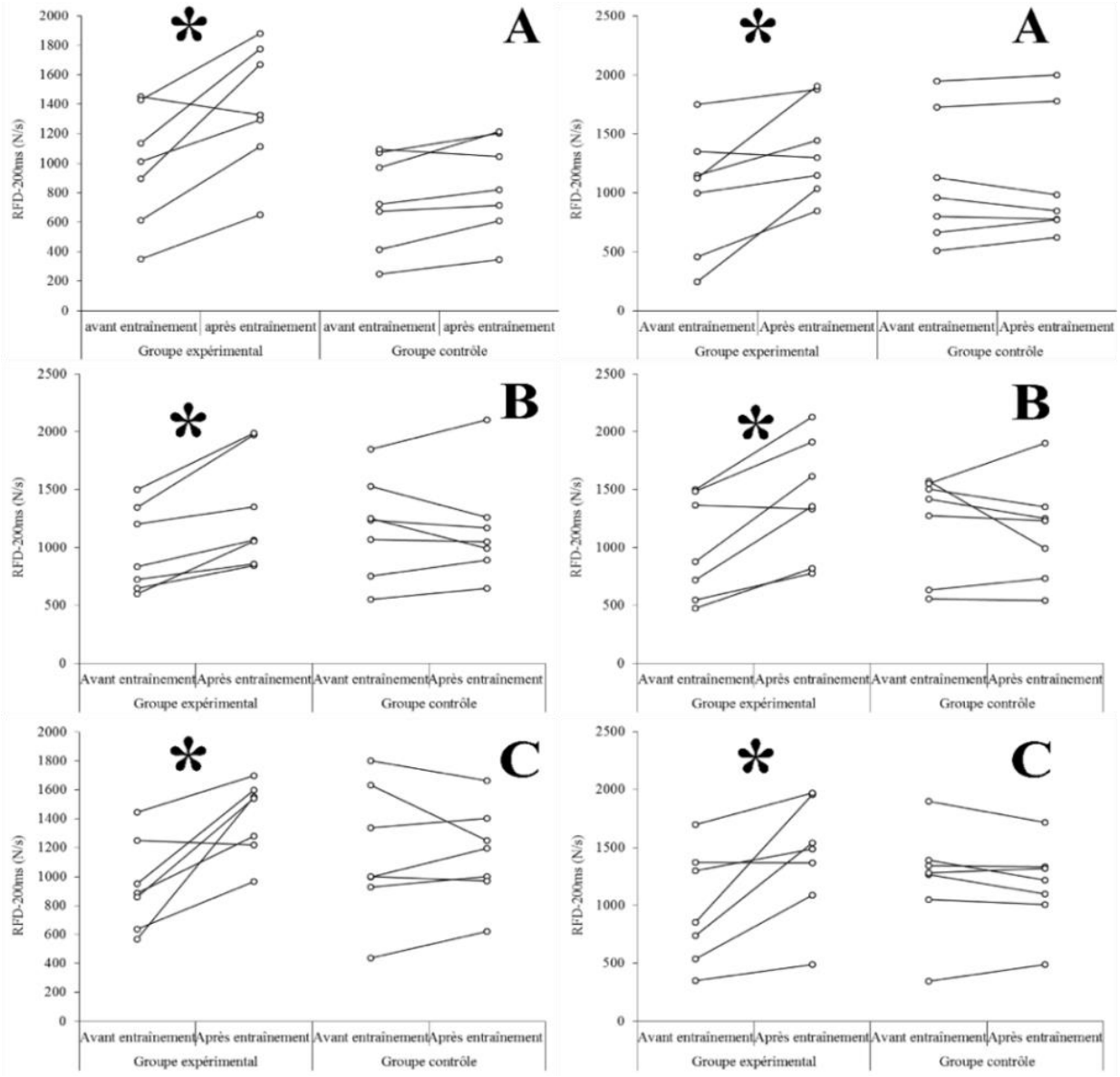


Figure 35: Evolution du RFD_{200ms} pour le groupe contrôle et expérimental entre la mesure 1 et 2.

* : différences significatives ($p < 0.05$) A : arquée ; B : semi tendue C : tendue.

<u>Interprétation et discussion</u> :

Tout d'abord, il est important de préciser que, dans cette étude, le temps moyen nécessaire au groupe expérimental pour atteindre la force maximale avant l'entrainement est de 2,62 ± 0,36 secondes. De plus, pour atteindre 95% de la force maximale, le temps moyen est de 1,12 ± 0,29 secondes. Par conséquent, sur de nombreux mouvements en bloc le temps pour saisir la prise sera toujours plus court que le temps nécessaire pour atteindre la force maximale ; augmenter le RFD est donc un moyen crucial d'accroître les performances.

Les résultats montrent un gain significatif du RFD_{200ms} pour le groupe expérimental pour les 3 préhensions (tendue, semi tendue et arquée). Une moyenne des gains de 32% pour la préhension tendue, de 27,5% pour la préhension semi tendue et de 28% pour la préhension arquée a été enregistrée. A l'inverse, aucune évolution n'a été mesurée pour le groupe contrôle. Le RFD est un facteur qui est affecté par l'entrainement [(Aagaard et al., 2002) ; (Aagaard, 2003)]. L'activation du muscle lors d'une contraction rapide et explosive est principalement déterminée par la fréquence des décharges d'unités motrices, c'est-à-dire liée au facteur nerveux (Aagaard et al., 2002). Cette décharge se produit au début de la contraction et est déterminante dans les 100 – 200 premières ms (Tillin et al., 2010). Une étude de 2003 montre qu'un entrainement de 12 semaines avec des contractions isométriques engendre une amplification de la fréquence des décharges des unités motrices avec comme conséquence une augmentation du RFD (Aagaard, 2003) (cf. figure 36). L'évolution du RFD_{200ms} serait donc due à une augmentation de la fréquence des décharges de l'unité motrice, comme suggéré par Aagaard.

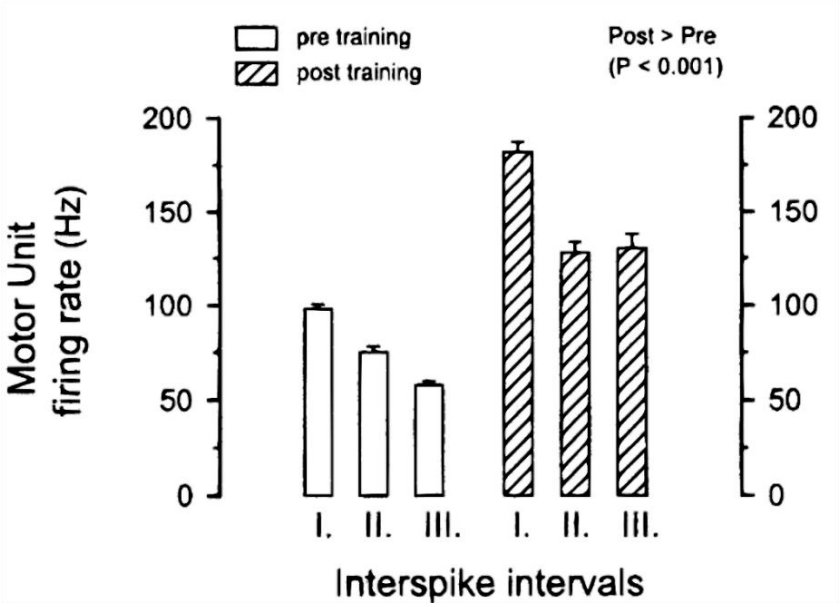


Figure 36 : Décharges des unités motrices lors d'une contraction maximale avant et après entrainement. Taux de décharges moyens enregistrés lors du premier, second et troisième intervalle. (Aagaard, 2003), données issus de (Van Cutsem, Duchateau et Hainaut, 1998)

De récentes études de 2019 viennent appuyer ces propos en expliquant que le RFD est intimement lié à la fréquence de décharge des unités motrices (Del Vecchio et al., 2019b). Cette étude s'attachant à analyser le membre inférieur, et plus précisément les tibial antérieur, fournit des résultats s'accordant avec ceux d'Aagaard (2003). De plus, une étude de 2019 sur

la variation du RFD en fonction d'un entrainement, met en lumière que cette évolution significative serait le résultat d'une baisse du seuil de recrutement des unités motrices (cf. figure 37) mais également d'une augmentation du nombre de motoneurones recrutés de la moelle épinière vers le muscle (Del Vecchio et al., 2019a) . Néanmoins, cette étude analyse une population sédentaire et il serait pertinent de s'intéresser à cette évolution chez une population de sportifs de haut niveau

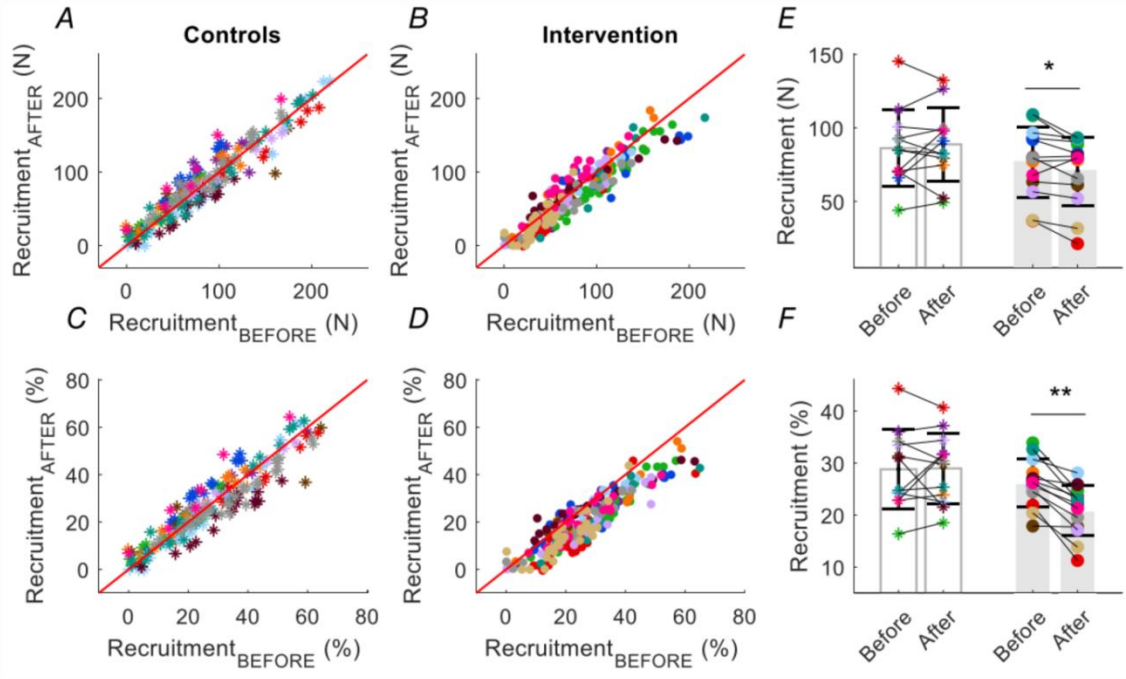


Figure 37 : Dispersion des seuils de recrutement pour les mêmes unités motrices pour chaque participant des groupes contrôles (astérix) et entrainement (cercles pleins). A et B : seuil de recrutement absolu (N) pour toutes unités motrices. C et D : seuil de recrutement normalisé et exprimé en pourcentage de la force maximale volontaire (% FMV). Valeurs moyennes des seuils de recrutement des unités motrices en absolue (E) et normalisée (F).

* : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$

(Del Vecchio et al., 2019a)

Le RFD_{200ms} est également lié à la force maximale volontaire. En effet, une étude de 2019 montre que l'évolution du RFD influence la FMV (Del Vecchio et al., 2019a). En d'autres termes, augmenter son RFD engendrerait une augmentation de la FMV. Dans le cas, présent, il y a une nette évolution du taux de développement de la force sans pour autant qu'il y ait une évolution de la FMV. Néanmoins, les résultats révèlent une absence de la variation de la force maximale volontaire à la suite d'un entrainement spécifique de 4 semaines.

Plusieurs hypothèses peuvent être faites. Etant donné qu'il s'agit de sportifs de haut niveau, les capacités d'augmentation de la production de force maximale apparaissent limitées et plus lentes à se développer. Une autre hypothèse serait d'énoncer que la FMV étant liée à des propriétés architecturales du muscle ; 4 semaines ne suffiraient pas pour développer la structure du corps charnu. En conséquence, il y aurait une évolution significative du RFD sans pour autant une évolution de la FMV. Cette dernière hypothèse expliquerait notamment le fait que 4 semaines n'ont pas eu d'effet sur l'évolution du $RFD_{95\%}$.

Il est admis que des propriétés contractiles du muscle (répartition des fibres de types II et I) mais également la structure musculo-tendineuse interviennent également dans l'augmentation du RFD [(Korhonen et al., 2006) ; (Tillin et al., 2010)]. Le fait qu'il n'y ait aucun effet sur le $RFD_{95\%}$ indique qu'un entrainement de 4 semaines n'a probablement eu aucun impact sur les facteurs structuraux (à savoir les fibres de type II) (Andersen et Aagaard, 2006). Il serait intéressant de confirmer cette hypothèse dans les études futures en analysant plus particulièrement l'évolution de l'architecture musculaire avec l'entrainement. En effet, dans son ouvrage de 2012, Hochholzer fait le constat que l'escalade engendrerait des évolutions structurales tant au niveau tendineux que musculaires. En effet, des analyses par imagerie à résonance magnétique (IRM) révèlent des différences entre des grimpeurs spécialistes et des non grimpeurs. Les résultats montrent que les ligaments latéraux au niveau des doigts et de la main sont davantage développés. Les tendons fléchisseurs des doigts ont un volume deux fois supérieur en comparaison à des non grimpeurs. De plus, les muscles intrinsèques de la main, à savoir les lombricaux et les interosseux auraient un volume musculaire (PCSA) augmenté de 30%. (Hochholzer et Schöffl, 2012). Nous pouvons donc formuler l'hypothèse qu'un entrainement spécifique et répété aura pour conséquence de faire également évoluer les propriétés architecturales du muscle. Les facteurs influençant le RFD_{200ms} sont présentés dans la figure ci-dessous (cf. figure 38).

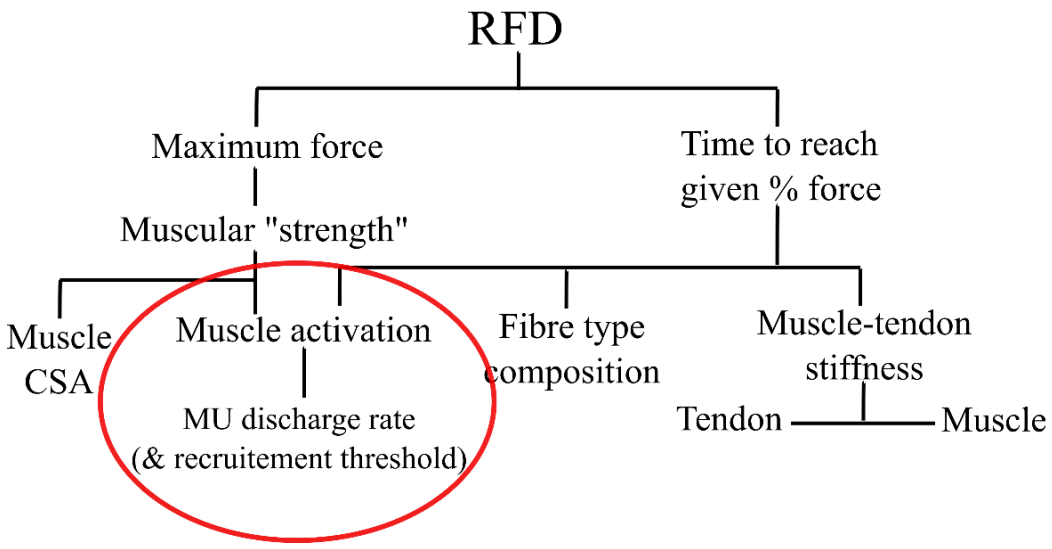


Figure 38: Présentation des différents éléments influençant le RFD (Maffiuletti et al., 2016).
En rouge sont entourés les facteurs évoluant avec un entrainement spécifique.

– Résumé –

La mesure du RFD_{50ms} ne révèle aucune différence entre les trois groupes. Si pour la préhension droite dominante, le RFD_{100ms} présente des différences significatives, il apparaît que la mesure du RFD_{200ms} montre des différences entre les grimpeurs internationaux, confirmés et les non grimpeurs. Ces différences importantes peuvent s'expliquer notamment en raison de la fréquence des décharges des unités motrices qui serait plus élevée pour les grimpeurs spécialistes en escalade. De plus, des facteurs structuraux tels que des propriétés architecturales peuvent également expliquer cette différence. La mesure du $RFD_{95\%}$ révèle elle aussi des différences importantes entre les trois groupes. Néanmoins, ce facteur étant très instable, il est difficile de l'interpréter.

En analysant l'effet d'un entrainement sur le RFD, il est montré que seul le RFD_{200ms} évolue de façon très importante. Cette évolution peut s'expliquer par l'augmentation de la fréquence des décharges mais également par une baisse du seuil de recrutement des unités motrices.

IV. Comparaison entre les grimpeurs de haut niveau en bloc et en difficulté

De nouvelles mesures ont été effectuées lors d'un stage avec l'équipe de France de difficulté en fin d'année 2018, encadré par l'entraineur de l'équipe de France, Cécile Avezou. Cette analyse complémentaire permet d'apporter des réponses quant aux différences de la force maximale volontaire et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts en fonction de la discipline sportive.

IV.1. Protocole expérimental

Des grimpeurs de haut niveau en difficulté (n = 8) ayant participé à des compétitions internationales ont réalisé le même protocole que l'étude n°2. Les données relevées sont comparées à des grimpeurs internationaux en bloc (n = 11).

IV.2. Analyse statistique

Les tests statistiques ont été traités à l'aide du logiciel STATISTICA (version 10, StatSoft, Inc., Tulsa, USA). La normalité ainsi que l'homogénéité des données ont été testées avant l'analyse à l'aide du test de Shapiro-Wilk et du test de Brown-Forsythe.

Un test T de Student est ensuite utilisé afin de comparer la force maximale absolue et normalisée des muscles fléchisseurs des doigts ainsi que les RFD_{200ms}.

IV.3. Résultats

Les coefficients de variations sont compris entre 4,76% et 6,39% avec une moyenne de 5,15% pour la force maximale, et entre 4,97% et 10,03% avec une moyenne de 8,75% pour le RFD_{200ms}. Les ICC sont compris entre 0,97 et 0,99 pour la force maximale et entre 0,91 et 0,98 pour le RFD_{200ms}.

La masse corporelle moyenne des grimpeurs de bloc est de 64,85 ± 3,00 kg et de 7,43 ± 1,89% de matière grasse. Pour les grimpeurs de difficulté, la masse moyenne est de 62,03 ± 3,96 kg et 7,95 ± 2,39% de matière grasse. Aucune différence significative n'est mesurée au niveau des données anthropométriques.

Les résultats concernant la force maximale et le RFD_{200ms} sont présentés ci-dessous (cf. figure 39 et 40, tableau 14). Les conditions semi tendues présentent des différences

significatives entres les grimpeurs de bloc et de difficulté pour le RFD ainsi que pour la force maximale.

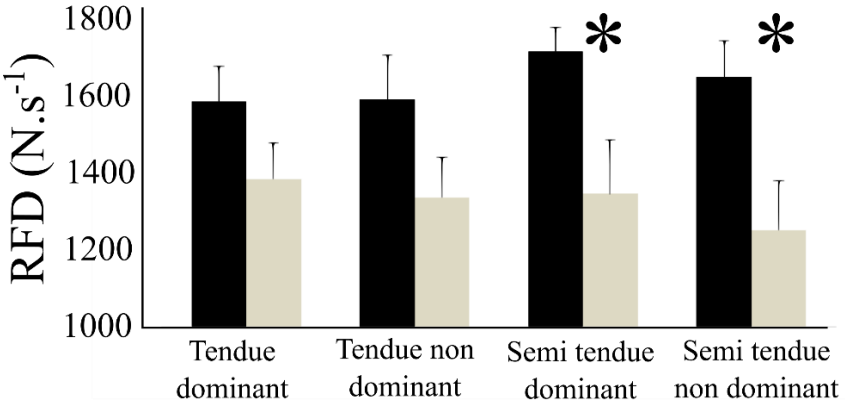


Figure 39 : Evolution de RFD_{200ms} en fonction de la spécialité sportive (gris : difficulté ; noir : bloc).

* représente les différences significatives à $p < 0.05$.

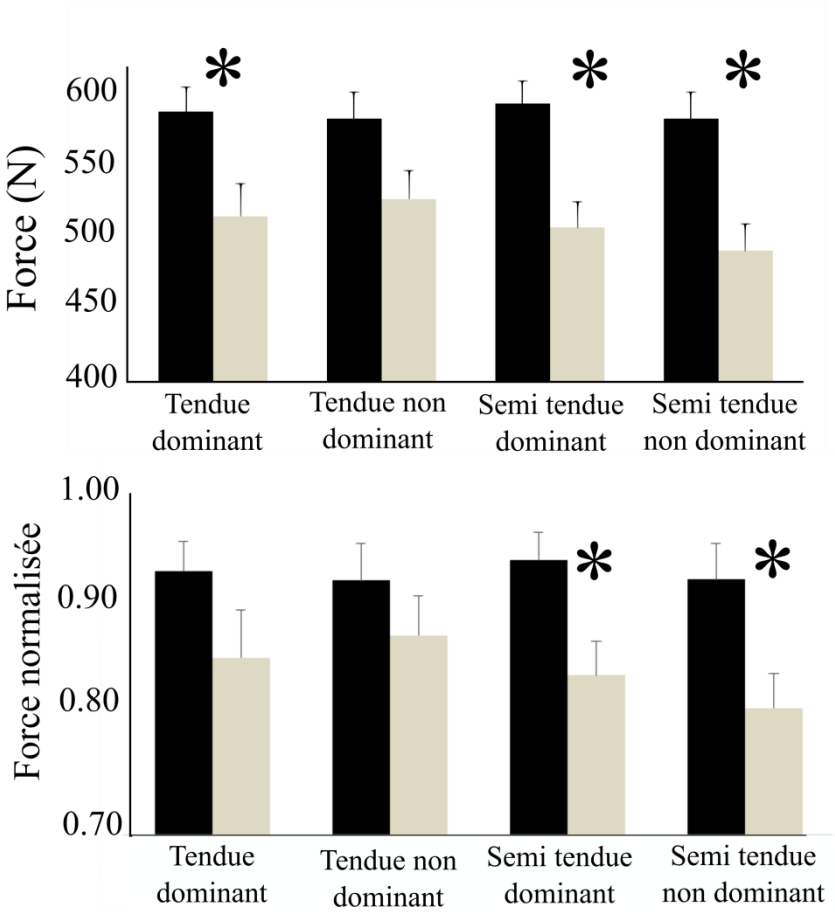


Figure 40 : Evolution de la force maximale absolue et normalisée en fonction de la spécialité sportive

noir : bloc ; gris : difficulté - * différences significatives à $p < 0,05$

		Bloc	Difficulté	% de différence	p
Fmax absolue	Tendue dominant	589 ± 17	516 ± 23	12,40	0,02 *
	Tendue non dominant	583 ± 19	528 ± 19	9,52	0,06
	Semi tendue dominant	594 ± 15	507 ± 18	14,60	< 0,01 *
	Semi tendue non dominant	584 ± 18	491 ± 18	15,84	< 0,01 *
Fmax normalisée	Tendue dominant	0,92 ± 0,02	0,85 ± 0,04	7,88	0,12
	Tendue non dominant	0,91 ± 0,03	0,87 ± 0,03	5,05	0,33
	Semi tendue dominant	0,93 ± 0,02	0,83 ± 0,03	10,38	0,02 *
	Semi tendue non dominant	0,91 ± 0,03	0,81 ±0,03	11,76	0,02 *
RFD_{200ms}	Tendue dominant	1617 ± 99	1406 ± 99	13,09	0,16
	Tendue non dominant	1625 ± 119	1355 ± 109	16,61	0,13
	Semi tendue dominant	1755 ± 68	1365 ± 147	22,22	0,02 *
	Semi tendue non dominant	1687 ± 98	1265 ± 135	24,97	0,02 *

Tableau 14 : Résultats de la force maximale absolue (N), normalisée et du RFD_{200ms} en fonction de la spécialité sportive

* différence significative ($p < 0.05$)

IV.4 Discussion et interprétation

Ces résultats sont très intéressants puisqu'ils montrent que les grimpeurs de bloc sont capables de produire une force maximale plus importante au niveau des muscles fléchisseurs des doigts en comparaison aux grimpeurs de difficulté. Cette même différence est retrouvée pour le RFD_{200ms} dans les conditions semi tendues. Ces spécificités peuvent s'expliquer notamment en raison des nombreux mouvements dynamiques qui sont présents en bloc (White et Olsen, 2010) avec des temps d'efforts très courts et avec une intensité très importante. Ces différences sont d'ailleurs en accord avec la littérature. En effet, une étude de 2013 a également montré que les grimpeurs de bloc ont une force maximale et un RFD plus importants que les grimpeurs de difficulté (Fanchini et al., 2013). Néanmoins, il s'agit de la première étude qui s'intéresse à des grimpeurs participants à des échéances internationales.

Par conséquent, la production de force maximale ainsi que la capacité à produire rapidement de la force au niveau des doigts apparaissent comme étant des facteurs de différenciations entre les spécialités sportives. La performance en escalade s'explique par des facteurs physiques tels que la force maximale et le RFD, ces indicateurs sont également discriminants au sein d'une population de sportifs de haut niveau**.** Si ce travail doctoral montre qu'il existe des spécificités au niveau des disciplines, il serait pertinent d'analyser les évolutions structurelles mais également nerveuses engendrées par ces différences de pratique.

V. Limites et perspectives

Ces trois études révèlent de nombreux résultats quant à la spécificité des grimpeurs de haut niveau en escalade. Néanmoins de nombreuses limites peuvent être soulevées et vont être analysées dans cette partie.

V.1. Limites

V.1.a. Limite liée au délai entre les mesures

Tout d'abord, la durée entre la fin du cycle d'entrainement et la seconde mesure n'est que d'une semaine. Il s'agit ici d'une limite de l'étude. En effet, il semble qu'un bornage sur une semaine ne soit pas suffisant afin que les processus de récupération et de surcompensation aient lieu. La raison pour laquelle les mesures ont été effectuées une semaine après le dernier entrainement est uniquement logistique et temporel. De fait, certains grimpeurs de haut niveau ne pouvaient plus être disponibles après ce délai, notamment à cause de leurs nombreux déplacements. Par ailleurs, d'autres grimpeurs débutaient de nouveaux cycles d'entrainements, engendrant nécessairement une fatigue physiologique et nerveuse. En raison de ces contraintes, les mesures ont dû être réalisées une semaine après la fin du cycle.

V.1.b. Limite liée à la posture

Il a été fait ce choix postural, afin de limiter les contributions des autres groupes musculaires. De plus ce choix a été fait de façon à proposer une situation se rapprochant de la pratique. Malgré cela, il est probable que le grand dorsal ait participé à la force soumise sur le dynamomètre, agissant en tant que muscle synergiste. Vraisemblablement, lorsque le grimpeur évolue sur une structure d'escalade, il met en action un ensemble de groupes musculaires. Par ailleurs, de nombreuses études montrent que des différences entre des sportifs élites et des novices s'expliquent par des coordinations inter musculaires plus fines et plus optimales, par exemple dans la discipline de la natation (Leblanc et al., 2005), dans le cyclisme (Chapman et al., 2009) et dans l'escrime (Williams et Walmsley, 2000). Ces synergies musculaires semblent donc participer à la performance sportive. Il serait possible de formuler l'hypothèse qu'en se centrant uniquement sur les muscles fléchisseurs des doigts (en soumettant le groupe musculaire à une contraction tétanique par exemple), les résultats seraient différents et pas nécessairement en lien avec la performance des sportifs élites.

L'argument qui serait d'énoncer que la contribution des muscles adducteurs des bras (le grand dorsal par exemple) et fléchisseurs du coude (biceps brachial par exemple) explique la différence entre les trois groupes, n'apparaît pas comme étant pertinent. *De facto*, dans leur étude, Ozimek et al. (2017) montrent qu'il n'existe pas de différence entre des grimpeurs confirmés et élites quant à la force produite lors d'une traction. Or, les résultats de la présente étude indiquent une différence significative entre des grimpeurs de haut niveau et des grimpeurs confirmés concernant la force mesurée par le dynamomètre. Par conséquent, il est possible d'affirmer que cette différence ne s'explique non pas par la force des muscles des bras, mais plutôt par les muscles fléchisseurs des doigts. Une autre possibilité serait d'énoncer que le test mesure une force maximale externe produite par les doigts, due à l'ensemble de la contraction de la chaine des membres supérieurs. Dans ce sens, il serait pertinent de faire varier le protocole expérimental, en ne se focalisant uniquement sur les muscles fléchisseurs des doigts, en empêchant la contribution des autres groupes musculaires. Une étude de Balas et al. (2014) compare le niveau de force des muscles fléchisseurs des doigts en fonction de la posture. Une position avec le coude complètement tendu serait plus représentative de la force des muscles fléchisseurs des doigts qu'avec un angle de 90 degrés au niveau du coude. Toutefois, les sujets ont un angle de 45 degrés entre le tronc et le bras dans le plan transversal engendrant une contribution de certains muscles comme le grand pectoral, ce qui n'est pas le cas dans nos études. En conclusion, ce choix de posture a été de se rapprocher le plus possible de la situation écologique. Une variation du protocole expérimental permettrait peut-être de mieux se focaliser sur les muscles fléchisseurs des doigts, en limitant au maximum la contribution des autres groupes musculaires.

V.2. Perspectives

Le test réalisé mesure une force dans l'axe vertical. Une étude d'Amca et al. (2012) montre qu'il existe également une force antéro-postérieure lorsque le grimpeur réalise une flexion de doigts. La posture, réalisée lors de ce travail de thèse limite la production de la force dans cet axe. Il serait néanmoins pertinent de s'intéresser davantage à cette force et de voir son évolution en fonction des différents niveaux d'expertise.

De plus, cette même étude montre que la force exercée par les muscles fléchisseurs des doigts varie en fonction de la préhension et de la taille de la prise (Amca et al., 2012). Plus la taille de la préhension est petite (< 2 cm) plus il y a de différences à propos de la force développée. En effet, en dessous de 2 cm, la force développée est significativement plus

importante en préhension arquée (439,6 ± 55,5 N) qu'en préhension semi tendue (360.8 ± 34.6 N) ou en préhension tendue (350,8 ± 56,0 N*)*. Il semblerait alors pertinent de diminuer la taille de la prise d'escalade et de voir l'évolution de la force maximale ainsi que du RFD.

Enfin, les résultats de ces études montrent que des facteurs nerveux et structuraux influencent la force maximale et le RFD des muscles fléchisseurs. Néanmoins, d'autres éléments peuvent avoir des incidences sur ces deux indicateurs, comme par exemple le système tendineux et métabolique. De futures recherches pourraient s'intéresser plus précisément à ces autres éléments chez des sportifs de haut niveau.

– Résumé –

De nombreuses limites sont présentes dans ces deux études qu'il convient de présenter.

La durée entre la fin de l'entrainement et la mesure de la force maximale et du RFD des muscles fléchisseurs des doigts apparaît comme étant faible (1 semaine), car dû à des contraintes logistiques.

La posture du test peut être critiquée et il serait intéressant de voir si des valeurs similaires sont retrouvées lorsque cette posture est légèrement modifiée et suit les exigences méthodologiques de l'étude de Balas et al. (2014). Néanmoins, nos valeurs sont proches de celles de la littérature et l'argument qui est d'énoncer que les muscles adducteurs des bras et fléchisseurs des coudes sont responsables de la différence entre les trois groupes, ne tient pas.

Il est montré que lors d'une flexion de doigts, une force dans l'axe antéro-postérieure est également appliquée. Il serait intéressant d'analyser l'évolution de cette force sur cet axe, notamment entre des groupes de différents niveaux. De plus, étant donné que la taille de la prise influence la force maximale développée, il apparaît pertinent de faire varier la taille de la prise dans ce test.

VI. Conclusions et applications pratiques

Après avoir rappelé les objectifs de cette thèse ainsi que les résultats obtenus, nous montrerons l'intérêt en citant certains de leurs apports possibles à la pratique de l'escalade de haut niveau.

VI.1. Conclusions

Un premier objectif est de concevoir un test permettant de mesurer spécifiquement la force et le taux de développement de la force des muscles fléchisseurs des doigts puis d'en vérifier la fiabilité et la reproductibilité. Notre étude montre que le test proposé est bien à la fois spécifique, fiable et reproductible. Il nous a ainsi permis d'avoir des premiers résultats intéressants pour l'évaluation des grimpeurs :

- La force maximale est un indicateur de la performance qui est effectivement utilisable car elle est stable d'une séance à l'autre. Le RFD présente, par contre, une variabilité importante lorsqu'on s'intéresse à l'ensemble des grimpeurs de tout niveau. Néanmoins, il s'avère beaucoup plus stable lorsqu'on se restreint à ceux qui participent aux compétitions internationales. Enfin le RFD constitue bien un indicateur utilisable pour l'évaluation de la performance chez ces sportifs.

Le second objectif est d'utiliser ces indicateurs pour voir s'ils sont en mesure de discriminer les groupes de différents niveaux d'expertise : internationaux / haut niveau, confirmés et non grimpeurs :

- Les grimpeurs de niveau international produisent une force maximale au niveau des muscles fléchisseurs des doigts significativement plus importante que les grimpeurs confirmés qui, eux même développent une force maximale plus élevée que les non grimpeurs. La force maximale des muscles fléchisseurs des doigts est donc bien discriminante du niveau.

- L'analyse du RFD_{200ms} et du $RFD_{95\%}$ apparaît également comme étant discriminant. Néanmoins le $RFD_{95\%}$, présente une faible stabilité limitant son interprétation.

Le troisième objectif est d'analyser l'impact d'un entrainement spécifique chez une population de haut niveau en escalade. Alors que la force maximale produite ainsi que le RFD n'ont pas évolué chez le groupe contrôle qui grimpait librement, il a été observé que chez le groupe expérimental, seule la condition « tendue droit » révèle un gain significatif concernant

la force maximale (+ 8%). Concernant le $RFD_{95\%}$, aucune évolution n'a été mise en évidence mais, en revanche, le RFD_{200ms} a montré des gains très importants. Ces premiers résultats peuvent s'expliquer notamment par l'augmentation de la fréquence de décharges des unités motrices. Concernant l'évolution des propriétés structurales du muscle, il faudrait probablement prolonger l'entrainement spécifique.

Enfin une étude des comparaisons sur ces facteurs a été effectuée chez des grimpeurs de haut niveau en bloc et en difficulté. Les résultats montrent que les grimpeurs de bloc présentent une force maximale volontaire ainsi qu'un RFD_{200ms} supérieurs aux grimpeurs de difficulté. Ces facteurs sont donc spécifiques à la discipline sportive. Il est très intéressant de s'y intéresser notamment dans les cadres de compétitions de type combiné où les grimpeurs participeront à plusieurs pratiques sportives. Si notre étude ne s'est pas intéressée à des grimpeurs de spécialistes de vitesse, les résultats montrent que dans le cadre d'une compétition de type combiné avec le bloc et la difficulté, les grimpeurs de bloc seraient avantagés.

En conclusion, notre étude révèle que la production de force maximale mais également la capacité à produire rapidement de la force sont bien des indicateurs fondamentaux pour l'évaluation de la très haute performance chez les grimpeurs.

VI.2. Applications pratiques

La force maximale volontaire et le RFD des muscles fléchisseurs des doigts apparaissent comme étant deux indicateurs caractéristiques des sportifs de haut niveau en escalade. Cette analyse met bien en lumière leur importance dans la performance sportive en escalade et, par-là, l'intérêt d'utiliser le test proposé en vue d'en évaluer régulièrement la progression durant un programme d'entrainement sportif spécifique.

Ce travail de thèse présente l'intérêt majeur d'être quasiment le seul à s'être intéressé à l'évaluation de la performance et de l'impact d'un entrainement spécifique chez des sportifs participants à des compétitions internationales d'escalade. Par exemple, il a montré qu'un entrainement spécifique permet de faire rapidement évoluer le RFD. Cela peut donc pousser un entraineur à travailler en priorité cette aptitude chez les athlètes à l'approche d'échéances sportives internationales.

PARTIE 2

RELATION FORCE-VITESSE-PUISSANCE CHEZ LES GRIMPEURS DE HAUT NIVEAU

SIMILITUDES ET SPECIFICITES

Chapitre I : Présentation de la relation force-vitesse-puissance

I. Intérêt de la relation force-vitesse-puissance en escalade

Dans une première partie, nous avons démontré que la force maximale et le RFD des muscles fléchisseurs des doigts sont discriminants en escalade. En outre, il est constaté qu'il y a d'importantes différences entre des grimpeurs de haut niveau de bloc et de difficulté. Ces résultats sont intéressants car ils mettent en avant les spécificités entre les deux disciplines.

Jusqu'à maintenant, la notion de production de mouvement n'a pas été encore abordée alors qu'elle est indispensable dans les activités physiques et sportives. Comme il l'a été précisé dans la première partie, l'escalade est une alternance entre phase mobile et immobile (Billat et al., 1995). Les phases mobiles se composent de mouvements dynamiques et statiques (White et Olsen, 2010). Les mouvements dynamiques induisent une notion de vitesse plus importante que les mouvements statiques. Par conséquent, l'analyse de la production de force à différentes vitesses prend donc tout son sens. Si les muscles fléchisseurs des doigts permettent de saisir et de tenir une prise d'escalade ; le mouvement n'est rendu possible que grâce à la production de force des membres supérieurs et inférieurs.

Il s'avère que la production de force externe des muscles actifs lors de la traction, apparaît comme caractéristique de la performance [(Magiera et al., 2013) ; (Ozimek et al., 2017)]. En effet, les sportifs élites en escalade sont capables de produire une force externe importante au niveau des membres fléchisseurs des bras, par exemple sur un test de tractions lestées. D'ailleurs Magiera et al. (2013) montrent bien dans leur analyse que la force des bras explique en partie la performance en escalade.

A notre connaissance, une seule étude s'intéresse à la vitesse qui est produite par les membres supérieurs (Laffaye et al., 2014) lors d'un mouvement d'une traction balistique chez des grimpeurs (cf. figure 41). Cette méthode validée montre que les grimpeurs élites sont significativement plus performants que les grimpeurs confirmés, eux-mêmes plus performants que les grimpeurs novices. Toutefois, elle ne permet pas de révéler de spécificités entre les grimpeurs élites de bloc et de difficulté au niveau de la hauteur atteinte (*arm jump score*). Par conséquent, ce test ne peut pas être utilisé dans le cadre de l'étude des spécificités chez des sportifs de haut niveau en escalade en fonction de leur discipline.



Figure 41 : « Arm jump test » allant de la position de départ (a) à la position finale (d).
(Laffaye et al., 2014)

A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de cette production de force externe des membres supérieurs à différentes vitesses chez des grimpeurs. Or, en escalade, le grimpeur doit régulièrement, à l'aide de ses membres supérieurs, produire une force à des vitesses différentes, en fonction de la situation (mouvement dynamique ou statique), mais également en fonction de sa spécialité sportive (bloc, difficulté et vitesse). Le fait que l'escalade soit aux Jeux Olympiques de 2020 sous la forme d'un combiné rend indispensable la mise en avant des spécificités entre les 3 disciplines.

Paradoxalement, de nombreux gestes sportifs tels que le squat jump (Samozino et al., 2008), le contre-mouvement-jump (Jiménez-Reyeset al., 2017), le développé couché (Rahmani et al., 2017) ont été observés par la relation force-vitesse-puissance. Ces études montrent l'évolution de la production de force externe à différentes vitesses. Les résultats de ces analyses ont apporté de nombreuses informations quant aux spécificités des athlètes afin d'améliorer la performance sportive. Pour l'heure, une seule étude a utilisé cette relation pour comparer des sportifs sur le mouvement de la traction (Muñoz-López et al., 2017). Or, ce mouvement est caractéristique en escalade et vecteur de la performance (Laffaye et al., 2014). Utiliser ce profil force-vitesse-puissance sur le mouvement de la traction permettrait donc d'étudier les différences ainsi que les spécificités entre des grimpeurs spécialistes de chaque discipline (bloc, difficulté et de vitesse).

– Résumé –

La force des muscles des bras est déterminante dans la performance en escalade. Une étude révèle des différences significatives concernant la production de force externe sur le mouvement d'une traction balistique en fonction du niveau d'expertise (élites, confirmés, novices). Néanmoins, elle ne permet pas de discriminer une population élite en fonction de sa discipline sportive. A notre connaissance, la relation force-vitesse-puissance apparaît peu étudiée sur le mouvement de la traction à l'inverse de nombreux mouvements (développé couché, contre-mouvement-jump).

L'objectif de ce présent travail est d'étudier les spécificités de la production de force externe des membres supérieurs à différentes vitesses dans les trois disciplines en escalade afin de les mettre en lumière.

II. Relation force-vitesse et puissance-vitesse

II.1. Interdépendance de la force et de la vitesse

La capacité de production de force externe au niveau des doigts permettant de saisir et tenir des prises d'escalade a été largement développée durant ce travail doctoral. Cependant, l'étude du déplacement du sportif rendu possible par la production de force des membres supérieurs n'a pas été abordée.

La vitesse est très importante dans la compréhension de la performance. Si elle n'est que le résultat de la production d'une force, elle est responsable du déplacement de l'athlète. La vitesse est définie comme étant la dérivée de la position par rapport au temps.

La puissance est également un paramètre primordial dans la performance du sportif car elle fait le lien entre la production de force et la vitesse du mouvement. Il est possible de l'écrire sous la forme de :

$$P(t) = \vec{F} * \vec{v} \qquad \text{Ou encore} \qquad P(t) = \frac{W(\overrightarrow{F})}{\Delta(t)}$$

avec P la puissance, $\vec{F}$ la force, $\vec{v}$ la vitesse et $W(\overrightarrow{F})$ la quantité de travail. Ce paramètre est défini comme étant le travail d'un système par unité de temps et s'exprime en Watts (W). Pour une production de vitesse équivalente, si la force produite augmente, alors la puissance augmente automatiquement. Toutefois, plus le mouvement est rapide, plus la force maximale que le sportif est capable de produire est faible. Il existe donc une relation entre la force, la vitesse et par conséquent la puissance, qui semble intéressante à décrire afin de comprendre la performance d'un geste sportif.

II.2. Relation au niveau du muscle isolé

Afin d'étudier les propriétés mécaniques du muscle, des études ont proposé des modèles mécaniques permettant de simuler le comportement du couple tendon-muscle. Hill (1938), propose un modèle à 3 composantes, associant une composante contractile (responsable de la force produite) à deux composantes élastiques placées en séries et en parallèles de la composante contractile. Les composantes élastiques n'interviennent que peu dans la production de force en partant d'une position de repos. De fait, il n'est analysé uniquement que la partie responsable de la production de force. Les mécanismes de cette

production de force peuvent être expliqués par la théorie des filaments glissants (Huxley, 1957). Les myofibrilles sont composées entre autres de filaments protéiques, de myosine et d'actine. Lors d'une contraction musculaire, les ions calcium se fixent au niveau de la troponine des filaments d'actine. La troponine fait basculer les molécules de tropomyosine, libérant ainsi les sites actifs de l'actine. Les têtes de myosine s'accrochent sur les sites actifs des filaments d'actine créant un pont acto-myosine. Les têtes de myosine tirent sur les filaments vers le centre du sarcomère. Une succession de ces étapes permet le raccourcissement de la fibre musculaire.

Ces relations entre production de force et vitesse de raccourcissement a été décrit mathématiquement par Hill en 1938. Ce dernier montre que la relation hyperbolique est inverse entre la force produite par un muscle isolé et la vitesse de raccourcissement. Il propose une équation de type :

$$(F + a)\,(V + b) = b\,(F0 + a) = a\,(V0 + b)$$

avec V0 la vitesse maximale de raccourcissement, F0 étant la force maximale isométrique, a et b des constantes ayant la dimension d'une force et d'une vitesse. La figure ci-dessous illustre cette relation entre charge exercée et vitesse produite (cf. figure 42) pour un muscle.

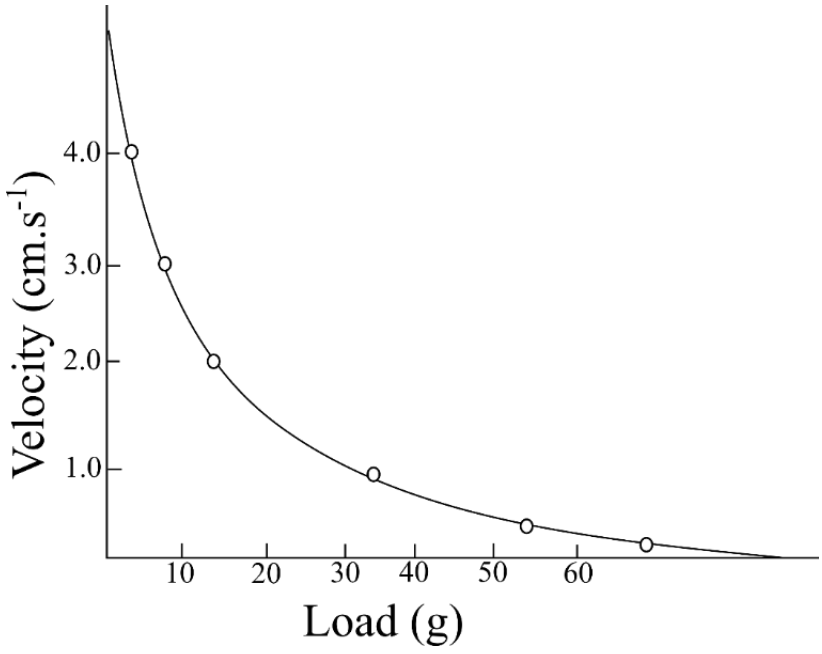


Figure 42: Evolution de la vitesse en fonction de la charge (g).

(Hill, 1938)

Cette relation hyperbolique inverse entre la force et la vitesse de raccourcissement du muscle fournit des informations sur les capacités de productions de force. En effet, l'intersection avec l'axe de la force représente la force maximale produite avec une absence de mouvement (force maximale isométrique) (F0). A l'inverse, l'intersection avec l'axe des coordonnées représente la vitesse maximale de raccourcissement du muscle avec une absence de production de force (V0). La puissance étant le produit de la force par la vitesse il est donc possible de tracer la relation parabolique qui représente une valeur maximale représentant la puissance maximale (Pmax) (Cormie, McGuigan et Newton, 2011) (cf. figure 43).

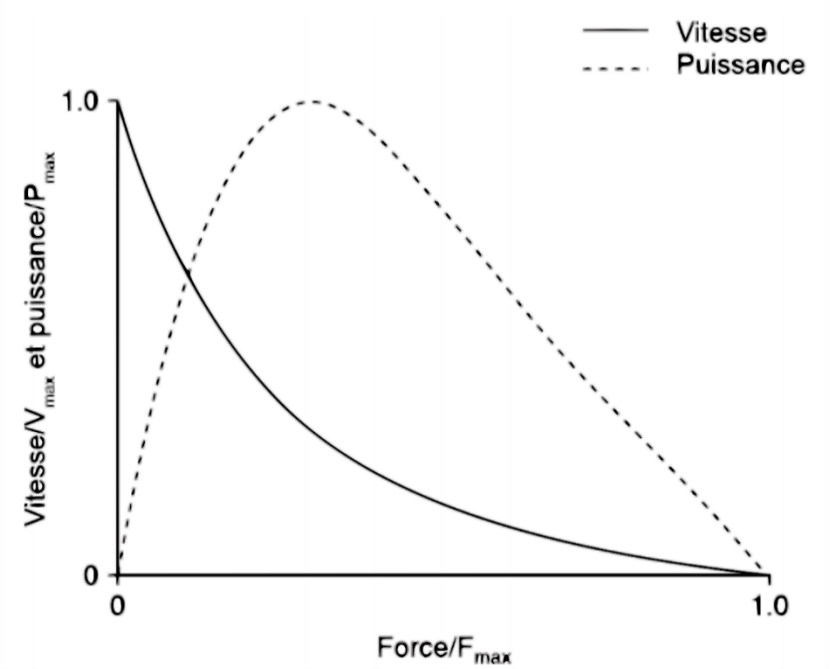


Figure 43 : Relation force-vitesse et puissance-vitesse des muscles squelettiques lors de contractions concentriques. La force, la vitesse et la puissance sont normalisées respectivement par rapport à la force maximale isométrique (Fmax), la vitesse maximale de raccourcissement du muscle (Vmax) et la puissance maximale (Pmax).

Néanmoins, dans le cas présent, les conditions expérimentales sont maîtrisées, c'est-à-dire que la fibre musculaire est soumise à une tension maximale, à une température donnée, etc… Il se pose donc la question de savoir comment se comporte ce muscle, in vivo c'est-à-dire lors d'une contraction volontaire.

II.3. Relation force-vitesse au niveau d'un mouvement mono-articulaire

Les capacités de production de force d'un mouvement mono-articulaire ont tout d'abord été étudiées en 1922 par A.V. Hill qui montre une diminution de la force avec

l'augmentation de la vitesse lors d'un effort maximal. Néanmoins, c'est l'équipe de Dern qui montre en 1947, sur le mouvement d'une flexion de coude, une forme hyperbolique entre la force et la vitesse (Dern et al., 1947). Cette même relation sera mise en avant sur d'autres mouvements mono-articulaires comme par exemple le groupe extenseur de genou. Par conséquent, il existe une similarité entre le comportement d'un muscle isolé et un groupe de muscle sur un mouvement mono articulaire au niveau de la relation force-vitesse et puissance-vitesse. Néanmoins, dans le cadre d'analyse de la performance, il n'est pas pertinent d'analyser un muscle isolé ou un mouvement mono articulaire mais plutôt de se focaliser sur le mouvement sportif et donc sur les coordinations entres plusieurs segments.

II.4. Relation force-vitesse au niveau des mouvements poly-articulaires

Une coordination motrice implique la sollicitation de différents groupes musculaires qui fonctionnent ensemble. Nous parlons alors de mouvement poly-articulaire car plusieurs articulations sont mises en jeu. De nombreux auteurs ont analysé différents mouvements tels que le sprint en course à pied (Jaskolski et al., 1996), le sprint en cyclisme (Arsac, Belli, et Lacour, 1996), le squat jump (Rahmani et al., 2000), le développé couché (García-Ramos et al., 2016) ou encore le mouvement de la traction (Muñoz-López et al., 2017). Ces auteurs mettent en avant qu'au niveau poly-articulaire, il y a une relation linéaire entre la force et la vitesse quel que soit le geste sportif. Plus la vitesse d'exécution augmente, plus la production de force diminue. Cette relation a été observée par Best et Partridge en 1928 sur la pratique du sprint (Best et Partridge 1928). La figure ci-dessous met en avant différentes relations force –vitesse en fonction de différentes pratiques sportives (cf. figure 44).

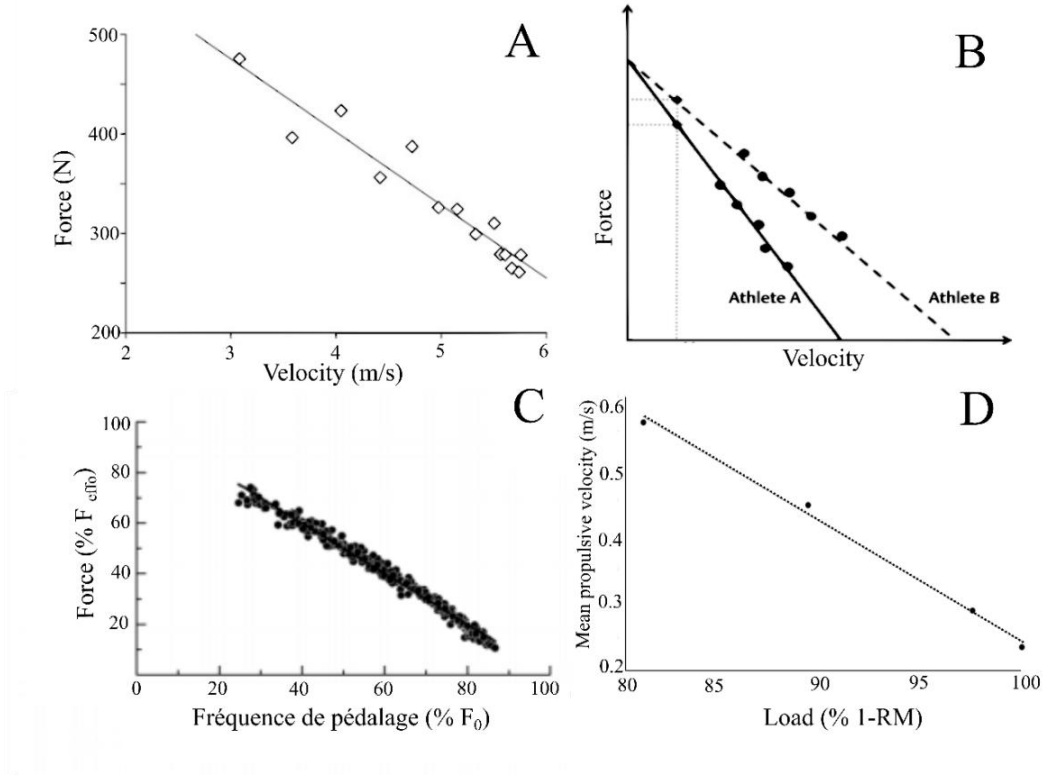


Figure 44 : Relation force vitesse mesurée sur du sprint (A) (Morin et al., 2010) ; sur du squat (B) (Rivière et al., 2017), en pédalage (Dorel et al., 2010) et sur des tractions (Muñoz-López et al., 2017).

Les raisons de cette linéarité sont encore débattues dans la littérature. Une étude de 2012 explique que des dynamiques segmentaires limiteraient la capacité de production de force de chaque muscle (Bobbert, 2012). En effet, la mesure de la relation force-vitesse lors d'une extension ou d'une flexion de coude n'analyse pas la mise en action d'un muscle particulier mais plutôt d'une synergie de muscles. Examiner un mouvement poly-articulaire fournit des capacités de travail permettant d'optimiser le système entier. Il semble alors difficile que chacun de ces muscles puisse fournir leurs conditions maximales de travail (Herzog, 2000). Il ne sera donc pas envisageable d'étudier les caractéristiques propres de chaque muscle dans ce type de relation.

II.5. Facteurs analysés par la relation force-vitesse-puissance

La relation linéaire entre la force et la vitesse apporte de nombreuses informations indispensables à notre travail dont l'objectif est la compréhension de la performance sportive.

Tout d'abord, en extrapolant la courbe, il est possible de déterminer deux paramètres clés dans la performance, à savoir F0 et V0. F0 correspond à la force maximale théorique à vitesse nulle (Samozino et al., 2008). V0 correspond à la vitesse maximale théorique à charge nulle (Vandewalle, Peres et Monod, 1987). Il s'agit de deux paramètres représentant les limites mécaniques et neuromusculaires des segments impliqués dans le mouvement. L'équation de la courbe (Sfv) fournie par la relation force-vitesse donne des indications sur les variations de la vitesse en fonction de la force et peut être exprimée sous la forme de :

$$Sfv = -\frac{F0}{V0}$$ (Samozino et al., 2012)

De plus, à partir de la vitesse produite pour une production de force externe donnée, il est possible de calculer la puissance (P) définie comme :

$$P = F * v$$

avec F la force et v la vitesse. L'illustration de cette puissance induit alors une parabole (polynomiale du 2ème degré) (cf. figure 45).

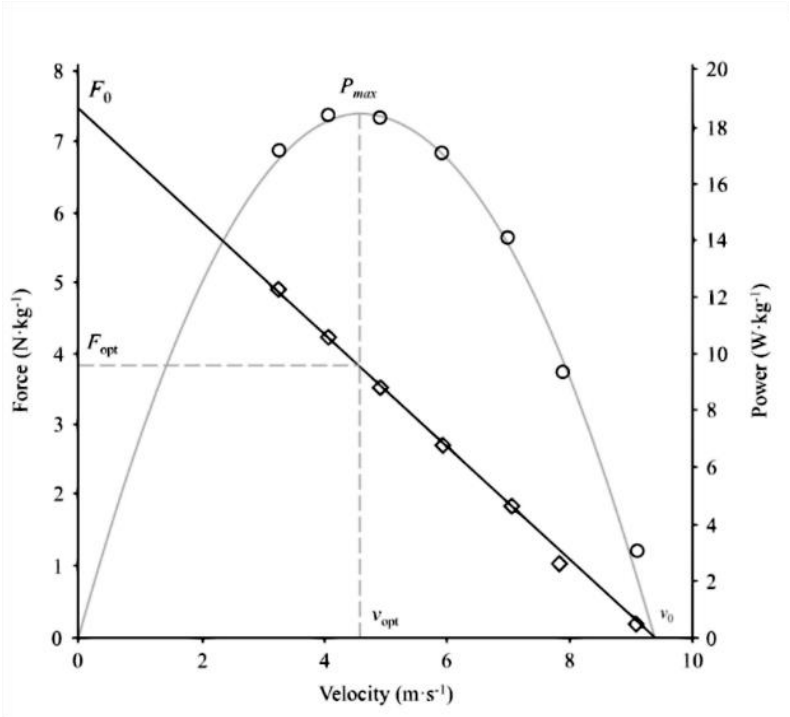


Figure 45 : Représentation graphique de la relation force-vitesse et puissance-vitesse. (Cross et al., 2017)

Cette forme en cloche est caractéristique de la puissance développée. Le sommet de la parabole correspond à la puissance maximale (Pmax) qu'un sujet peut développer lors d'un mouvement (Cross et al., 2017). Sur le plan algébrique, il est possible de définir la puissance maximale telle que :

$$Pmax = \frac{F0 * V0}{4} \qquad \text{(Samozino et al., 2012)}$$

Plus précisément, il s'agit du rapport optimum entre la force et la vitesse (Vopt) qui peut être écrit sous la forme de :

$$Vopt = \frac{V0}{2}$$

L'ensemble de ces paramètres (V0, F0, Sfv, P, Pmax, Vopt) peut être comparé entre des individus, fournissant des informations sur les capacités mécaniques de la production de force externe des sportifs sur le même mouvement. Une étude de Samozino et al (2012), met en avant la notion de profils « orientés force » et de profils davantage « orientés vitesse » illustrée dans la figure de ci-dessous (cf. figure 46) (Samozino et al., 2012).

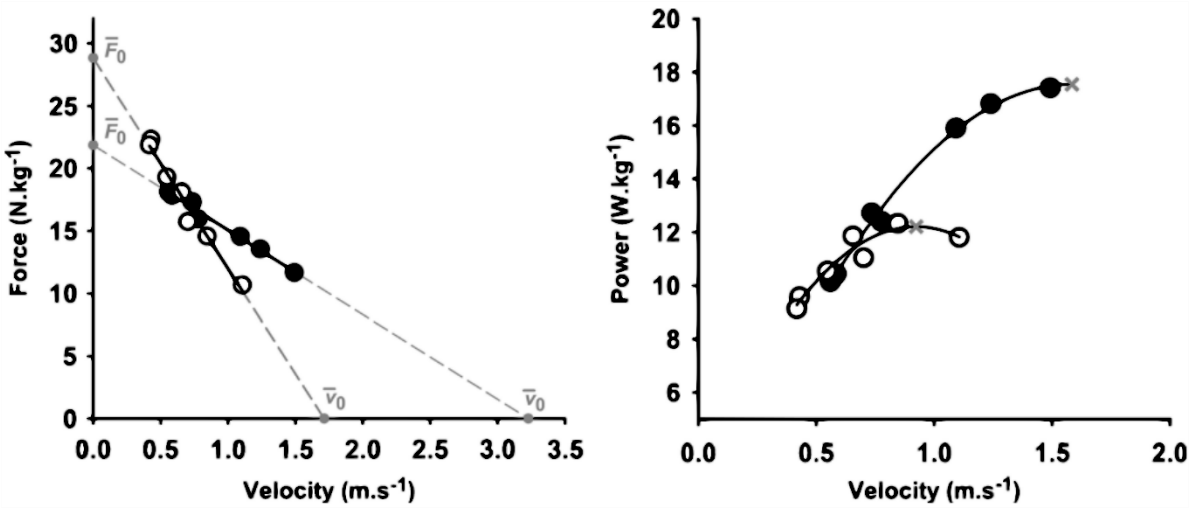


Figure 46 : Relation force-vitesse (graphique gauche) et puissance-vitesse (graphique droit) typique pour deux sportifs avec des profils différents
(Samozino et al., 2012)

Les deux graphiques nous montrent bien que pour l'athlète 1 (ronds pleins), V0 est plus élevée que pour l'athlète 2 (ronds creux) et que cela a donc une incidence sur le profil puissance-vitesse. Les deux athlètes présentent des différences concernant leur puissance

maximale théorique. Néanmoins, il est possible d'avoir une Pmax identique avec des V0 ainsi que des F0 différents. Par conséquent, la mesure de la puissance maximale à elle seule n'apporte pas la totalité des réponses sur les profils des athlètes.

L'analyse des mouvements de types squat jump, contre-mouvement-jump, développé couché apporte des réponses quant à la performance sportive. En effet, Cronin et Hansen (2005) montrent qu'il y a une corrélation entre le squat, le-contremouvement-jump et la vitesse atteinte au sprint sur 5 mètres, 10 mètres et 30 mètres (Cronin et Hansen, 2005). Néanmoins, une récente étude de 2018 explique que la relation entre le niveau de performance et les indicateurs fournis par les relations force-vitesse et vitesse-puissance n'est pas si triviale, principalement chez une population d'athlètes de haut niveau (Jiménez-Reyes et al., 2018). Cette étude a comparé les résultats entre *squats jumps* (SJ) à différentes charges et des sprints horizontaux linéaires à différentes distances (30 et 40 mètres). Après avoir calculé les relations force-vitesse et puissance-vitesse pour le mouvement du squat jump et les sprints, les auteurs se sont intéressés aux corrélations entre les paramètres mécaniques (F0, V0, Pmax). Les corrélations apparaissent comme étant très variables et faibles chez une population de sportifs de haut niveau. Les auteurs recommandent donc d'évaluer les relations force-vitesse et puissance-vitesse dans différentes conditions (sauts et courses) afin d'avoir un meilleur aperçu des capacités mécaniques maximales des membres inférieurs, notamment chez les sportifs de haut niveau (Jiménez-Reyes et al., 2018).

– Résumé –

L'analyse de la relation force-vitesse sur des mouvements poly-articulaires met en avant une linéarité entre la production de force et la vitesse produite. Plus précisément, plus la vitesse est rapide moins la production de force est importante. L'étude de ces mouvements fournit de nombreuses informations quant aux capacités mécaniques d'un système entier mais n'apporte pas de réponses précises sur les capacités maximales de production de force d'un muscle en particulier.

Cette linéarité permet de tracer une relation force-vitesse ainsi qu'une relation puissance-vitesse sous la forme d'une parabole, fournissant de nombreux paramètres, à savoir :

- V0, la vitesse maximale théorique produite par le mouvement à force nulle,

- F0, la force maximale théorique à vitesse nulle,

- Sfv, l'équation de la courbe entre la force et la vitesse,

- P, la puissance étant le produit de la force et de la vitesse,

- Pmax, la puissance maximale externe.

Étant donné que l'analyse des mouvements tels que le squat, le développé couché ou encore les tractions est corrélée à l'analyse des performances sportives, étudier ces paramètres apporte des informations sur ces performances. Néanmoins, afin d'avoir un aperçu plus approfondi des capacités mécaniques du membre étudié, certains auteurs recommandent de réaliser plusieurs gestes sportifs différents, à savoir la course et les sauts.

III. Evaluation des capacités mécaniques

Différentes évaluations indirectes peuvent être proposées afin d'évaluer les capacités mécaniques d'un mouvement poly-articulaire. L'objectif de cette partie est de présenter les différents tests possibles. Ces méthode de terrain permettent d'estimer la puissance d'un athlète sur un geste spécifique sans avoir recours à une plateforme de force ou autre outil mesurant l'évolution précise de la production de force, de la vitesse ou encore l'accélération.

III.1. Evaluation des capacités mécaniques par des méthodes de terrain

L'étude des capacités mécaniques des sportifs peut être analysée de différentes façons. Sargent et al. (1921) présentent un test mesurant les qualités de détente des membres inférieurs à partir du déplacement vertical du centre de masse au cours d'un saut. Un système de marques, entre la hauteur initiale de la main tendue en position debout et le point le plus haut atteint lors du saut, permet d'estimer le déplacement du centre de masse (cf. figure 41). La configuration du corps étant la même entre la position initiale et finale, il est possible de considérer que l'élévation de la main est égale à l'élévation du centre de masse du sujet. D'autres outils permettant de mesurer ce déplacement vertical se sont ensuite développés. Le test d'Abalakov permet de mesurer la détente en mettant en avant le cycle étirement raccourcissement (SSC). Le sportif part debout, exécute un contremouvement et réalise ensuite un saut le plus haut possible. Un ruban attaché à sa taille permet de mesurer le déplacement du centre de masses (cf. figure 47). Bosco et al. (1983) proposent un test sur un tapis mesurant cette fois-ci le temps d'envol lors du saut. Le tapis calcule le temps écoulé entre le moment où les membres inférieurs quittent le tapis et retouchent de nouveau le sol grâce à un système électrique fermé (cf. figure 47). La hauteur atteinte du centre de masses est calculée à partir de la formule suivante :

$$h = \frac{1}{8} g t f^2$$ (Bosco, Luhtanen et Komi, 1983)

h étant le déplacement total réalisé par le centre de masses et t_f étant le temps de la phase aérienne.

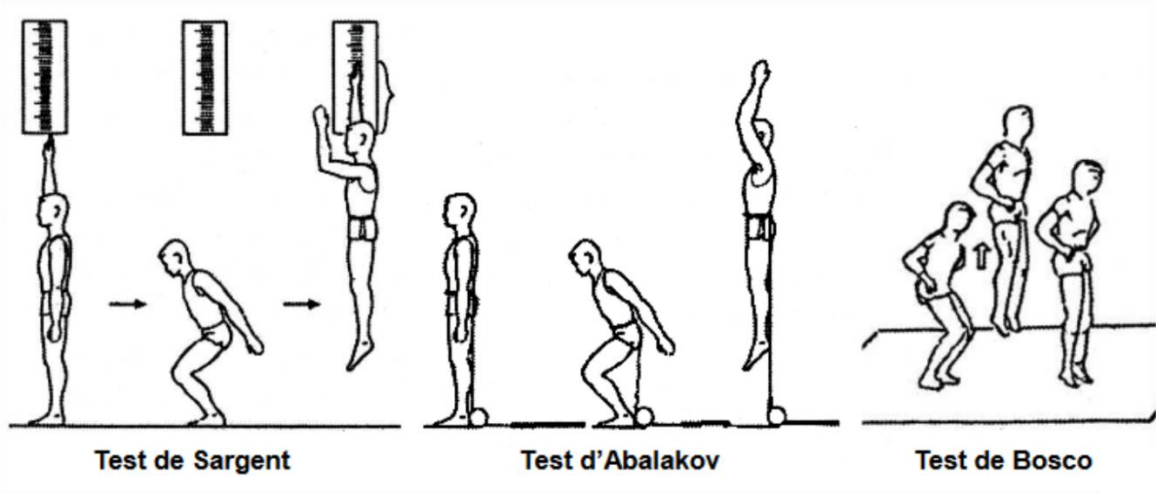


Figure 47 : Tests mesurant la détente verticale.

(Rahmani, 2000)

III.2. Estimation indirecte de la puissance maximale

En 1966, Margaria et al. (1966) proposent un test mesurant la puissance anaérobie des membres inférieurs. Après un échauffement complet, le sportif réalise une course de 6 mètres et grimpe le plus rapidement possible allant directement à la marche 3, puis à la 6 et enfin à la 9. L'objectif est de mesurer la taille des marches et prendre le temps que le sportif met pour monter de la marche 3 à la 9 (à 0,01 secondes près). Il alors possible de mesurer la puissance anaérobie à partir de la formule suivante :

$$P = \frac{Mgh}{\Delta t}$$

M étant la masse de l'athlète, g l'accélération gravitationnelle (9,81 $m.s^{-2}$), h est la hauteur entre la $3^{ème}$ et la $9^{ème}$ marche et Δt le temps mis pour aller de la marche 3 à la marche 9. Ce test permet de mesurer la puissance du sportif sans nécessiter d'outils scientifiques.

En 1983, Bosco et al proposent un test simple qui se présente sous la forme de rebonds verticaux entre 5 secondes et 60 secondes (Bosco et al., 1983). La puissance moyenne (P_{moy}) développée pour chaque saut est égale à :

$$P_{moy} = \frac{g^2 t_t \, t_v}{4 t_c} \qquad \text{(Bosco et al., 1983)}$$

avec t_t étant le temps total du saut, t_v le temps en phase aérienne et t_c le temps de contact entre les deux phases de vol. Néanmoins, l'ensemble de ces méthodes ne permet que des mesures indirectes de la puissance. Le tableau ci-dessous dresse une récapitulatif des différentes méthodes permettant l'estimation de la puissance maximale (cf. tableau 15).

Authors	Equations
Lewis	$\sqrt{4.9}\ 9.8$ body mass (kg) $\sqrt{\text{jump height (m)}}$
Harman *et al.*[7]	(61.9 jump height (cm)) + (36 body mass (kg)) – – 1 822
Bahamonde [12]	(78.5 jump height (cm)) + (60.6 body mass (kg)) – – (15.3 height (cm)) – 1 308
Sayers *et al.*[9]	(60.7 height SJ (cm)) + (45.3 body mass (kg)) – – 2 055
	(51.9 height CMJ (cm)) + (48.9 body mass (kg)) – – 2 007
Shetty [10]	(1 925.72 jump height (m)) + (14.74 body mass (kg)) – – 66.3
Canavan *et al.*[5]	(65.1 jump height (cm)) + (25.8 body mass (kg)) – – 1 413.1

SJ: squat jump; CMJ: counter movement jump.

Tableau 15 : Equations permettant d'estimer la puissance maximale.
(Lara et al., 2006)

Toutefois, une étude récente explique que la hauteur atteinte lors d'un squat jump et d'un contre-mouvement jump ne représente pas toujours un indicateur pertinent des capacités de puissances maximales, remettant donc en cause les méthodes fournies dans le tableau précédent (cf. tableau 15) (Morin et al., 2019). Les précédentes études ne prenant en considération uniquement des données anthropométriques ainsi que la hauteur maximale atteinte lors du centre amèneraient à des estimations de puissances erronées. Les auteurs expliquent que la masse des athlètes, la hauteur atteinte du centre de masse lorsque le participant quitte l'appui du sol, la charge optimale mais également le profil force vitesse sont indicateurs mettant mieux en lumière la relation entre hauteur du saut et puissance. Ils expliquent d'ailleurs qu'une méthode développée par Samozino en 2008 permettrait une estimation plus précise des capacités maximales de puissances d'un athlète (Samozino et al., 2008). Dans ce sens, il nous apparaît donc crucial de s'intéresser plus particulièrement à cette méthode.

III.3. Modèle biomécanique étudiant la relation force-vitesse-puissance

En 2008, une étude propose une méthode simple mesurant la relation force-vitesse-puissance sans avoir besoin d'utiliser d'outils méthodologiques (Samozino et al., 2008). Il suffit de ne relever que les données anthropométriques du sportif ainsi que les mesures fournies lors d'un squat jump (cf. figure 48), à savoir :

- h_s , la hauteur du centre de masse en position initiale (CM)

- h_{po}, la hauteur atteinte du CM lorsque le sportif décolle ses pieds du sol

- h, la hauteur maximale atteinte

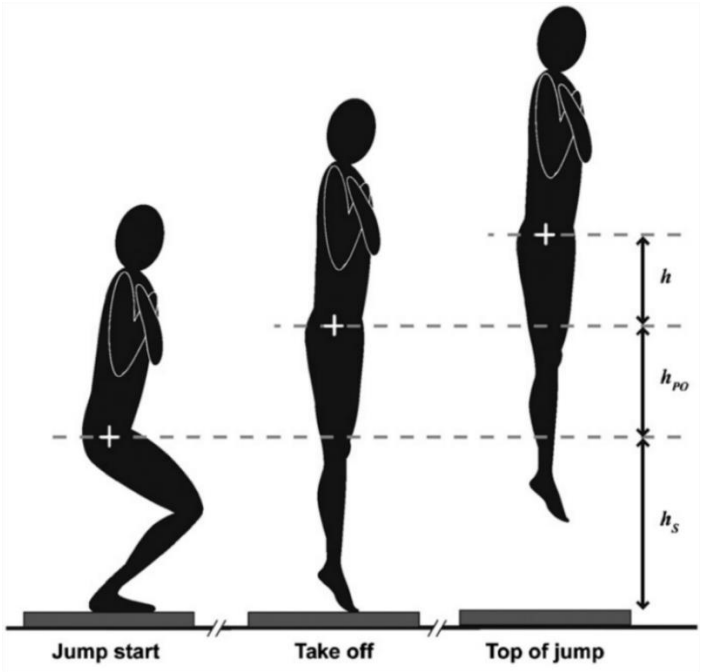


Figure 48: Figure illustrant les trois valeurs clefs dans la méthode computationnelle de Samozino. (Samozino et al., 2008)

Avec ces trois valeurs, Samozino et al. (2008) calculent le travail total réalisé par le système, ce qui équivaut à l'évolution de l'énergie potentielle entre les deux positions tels que :

$$Wt = mg(hpo + h + hs) - mghs \quad \text{Ce qui équivaut à} \quad Wt = mg\,(hpo + h)$$

(Samozino et al., 2008)

avec *m* la masse du sportif, *g* l'accélération gravitationnelle. En prenant en compte que *WT* est égal au produit de *hpo* multiplié par la force verticale moyenne générée par les membres inférieurs, il est possible d'écrire :

$$F = \frac{Wt}{hpo} \quad \text{Ou encore} \quad F = mg\,(\frac{h}{hpo} + 1)$$ (Samozino et al., 2008).

La vitesse moyenne verticale du CM durant la phase de poussée peut être formulée sous la forme de :

$$v = \frac{hpo}{tpo}$$

avec *tpo*, la durée de la phase poussée, obtenue à partir de la relation impulsion-moment. Etant donné que la vitesse de départ est nulle, l'équation peut être formulée sous la forme de :

$$tpo = \frac{mvto}{(F - mg)}$$ (Samozino et al., 2008)

avec vto, la vitesse verticale atteinte lors du début de la phase aérienne calculée par :

$$vto = \sqrt{2gh} \quad \text{Par conséquent} \quad v = \sqrt{\frac{gh}{2}}$$ (Samozino et al., 2008).

Enfin, la puissance étant le produit de la vitesse et de la force, il est possible d'exprimer la puissance comme :

$$P = mg\left(\frac{h}{hpo} + 1\right)\sqrt{\frac{gh}{2}}$$ (Samozino et al., 2008).

Samozino et al. (2008) comparent les valeurs de vitesse, de force et de puissance trouvées par leur méthode avec celles fournies par une plateforme de force. Les résultats indiquent que les valeurs entre la méthode computationnelle et la plateforme de force sont proches. Les coefficients de variation (CV) de la force, de la vitesse et de la puissance sont compris entre 2,52% et 7,24% pour la plateforme de force et entre 2,56% et 6,35% pour la méthode computationnelle (Samozino et al., 2008). De plus le test de Bland et Altman (1983) confirme la différence entre les valeurs des deux méthodes (cf. figure 49). Ceci est très

intéressant et permet d'analyser facilement la relation entre la force, la vitesse et la puissance sans utilisation d'outils scientifiques.

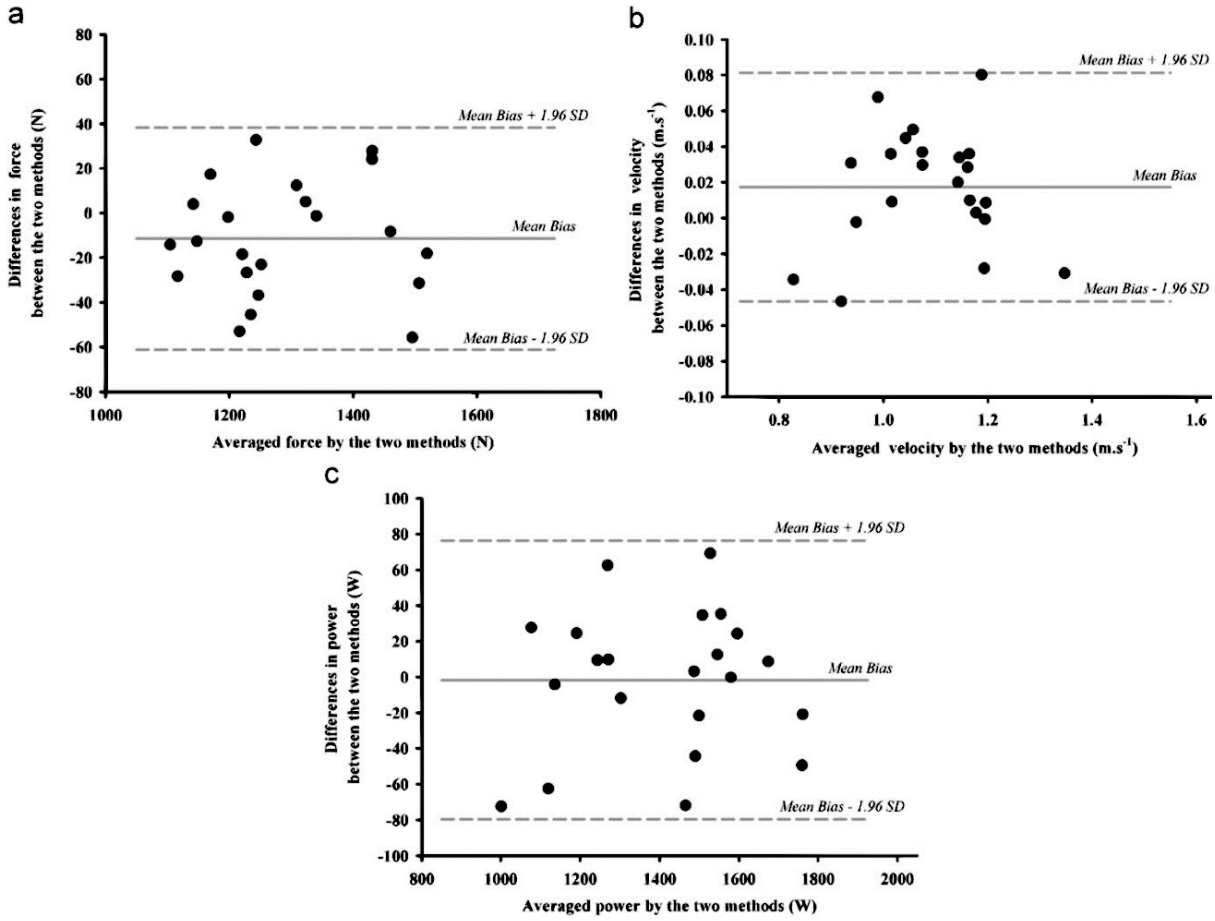


Figure 49 : Différences entre la plateforme de force et la méthode computationnelle pour la force (a), la vitesse (b) et la puissance (c). La ligne horizontale continue correspond au biais moyen. Les lignes pointillées horizontales supérieures et inférieures représentent les limites de degrés de liberté (moyenne ±1,96 écarts-types de la différence entre les méthodes).

Une récente étude de 2017 reprend le même principe et l'applique sur le développé couché (Rahmani et al., 2017). Cette étude compare les résultats entre une méthode computationnelle et ceux fournis par un accéléromètre. Elle montre bien que cette méthode computationnelle peut être utilisée afin de mesurer la relation force-vitesse-puissance sans appareil de mesures.

Cette méthode simple permettant de mesurer la relation force-vitesse-puissance chez des sportifs pourrait être réalisée sur le mouvement de la traction. Néanmoins, celle-ci demande de créer un modèle biomécanique qui serait une perspective très intéressante dans la prolongation de ce travail de thèse.

– Résumé –

De nombreuses méthodes de terrain permettent d'évaluer les capacités mécaniques lors d'un mouvement poly-articulaire (test de Sargent, test de Bosco…). Ces différentes méthodes apportent des réponses sur les capacités de production de forces externes d'un athlète à poids de corps. Ces méthodes de terrain permettent d'estimer indirectement la puissance maximale qu'un athlète est capable de produire. Néanmoins, de récentes études remettent en cause l'estimation de la puissance maximale des capacités mécaniques du membre analysé. Une récente étude de 2019 préconise de davantage suivre la méthode proposée par Samozino en 2008, s'appliquant au membre inférieur.

IV. Analyse de la relation force-vitesse-puissance par des outils méthodologiques

L'objectif de cette partie est de présenter les différents outils méthodologiques permettant d'analyser la relation force-vitesse-puissance.

IV.1. Utilisation de la plateforme de force

Avec l'apparition et le développement des outils électroniques d'une grande précision, il devient alors possible d'analyser plus précisément la relation entre la production de force externe à différentes vitesses. Plusieurs études ont approfondi cette relation force-vitesse-puissance sur des segments inférieurs *via* une plateforme de force par exemple sur le mouvement du contre-mouvement-jump (Jiménez-Reyes et al., 2014). Cet outil permet de mesurer les forces appliquées dans le plan sagittal, frontal et horizontal. Il est alors possible de mesurer l'accélération ainsi que la vitesse du centre de masses sur certains mouvements comme la marche ou le saut. En outre, en faisant varier la charge additionnelle de l'athlète il est possible de voir l'évolution des différentes composantes citées précédemment dans les trois plans. Ce type d'outil permet de réaliser des mouvements proches des situations auxquelles le sportif sera confronté dans sa discipline. Les informations analysées seront donc pertinentes dans la compréhension de la performance. Toutefois, ce travail s'intéressant aux membres supérieurs, l'utilisation d'une plateforme de force apparaît limitée.

IV.2. Utilisation d'outils embarqués

De nouveaux outils comme des opto jump, encodeurs linéaires ou encore des accéléromètres « myotest » sont des appareils scientifiques permettant également d'analyser la relation force-vitesse-puissance. Le myotest mesure l'accélération verticale instantanée (en $m.s^{-2}$) ainsi que la force à chaque instant suivant la seconde loi de Newton :

$$F = a * m$$

avec *a* l'accélération et *m* la masse du système.

Le Myotest a l'avantage d'être facilement transportable et peut se fixer sur l'athlète lorsque celui – ci réalise un mouvement. Dans le cadre de ce travail où le grimpeur réalise une traction, l'utilisation d'un Moytest dans l'analyse de la relation force-vitesse-puissance est

d'un grand intérêt. D'ailleurs Laffaye et al. (2014) utilisent un Myotest afin d'estimer la puissance des grimpeurs.

IV.3. Fiabilité des outils embarqués

Casartelli et al. (2010) étudient la fiabilité d'un Myotest sur différents mouvements (squats, contre-mouvement-jump, sauts à répétition) et comparent les résultats avec ceux d'un opto-jump (Glatthorn et al., 2011). Les résultats montrent une bonne fiabilité des deux appareils de mesure. En revanche, les paramètres fournis par le Myotest (notamment la vitesse) sont surestimés. Le Myotest semble donc présenter certaines limites sur la précision des mesures.

Néanmoins, une étude de Giroux et al. (2015) révèle une meilleure précision des mesures du Myotest. Elle compare sur un mouvement de squat-jump les données fournies par un opto jump, un encodeur linéaire, une plateforme de force ainsi qu'un Myotest (Giroux et al., 2015) (cf. figure 50).

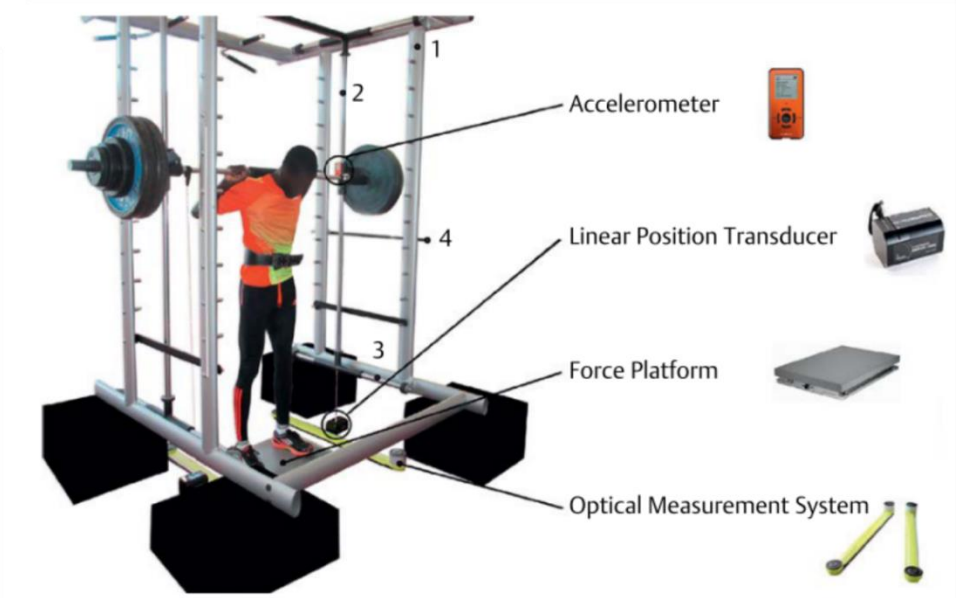


Figure 50 : Plate-forme de force (FP), encodeur linéaire (LntT), accéléromètre (Acc) et système de mesure optique (Opto jump) permettant de déterminer la hauteur de saut et mesurer la force, la vitesse et la puissance.
(Giroux et al., 2015)

Une étude de la fiabilité montre que les valeurs fournies par les différents outils scientifiques sont légèrement différentes et sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf.

tableau 16). Les données fournies par l'accéléromètre apparaissent moins fiables que celles fournies par la plateforme de force, en gardant des coefficients de variations convenables entre 5,3% et 10,2% pour la vitesse et la force. Dans le cadre de l'utilisation d'accéléromètre de type myotest, les résultats révèlent une bonne fiabilité. De plus, les mesures de vitesses sont similaires aux autres outils de mesure. Concernant la force, il existe une différence négligeable (3,5%) entre les valeurs fournies par l'accéléromètre et celles fournies par l'accéléromètre. Dans ce sens, l'accéléromètre semble donc être un outil de mesure fiable.

		FP	LnT	Acc	Sam
Force (N)	Mean	1453.4	1469 .7	1505.9	1407.7
	SD	371.6	354.0	381.5	372.8
	ICC	0.98	0.96	0.97	0.99
	CV %	3.1	5.0	5.3	2.7
Velocity ($m.s^{-1}$)	Mean	0.8	0.9	0.9	0.7
	SD	0.16	0.2	0.2	0.2
	ICC	0.88	0.86	0.84	0.97
	CV %	7.3	9.3	10.2	6.5
Power (W)	Mean	11103.3	1241.7	1302.1	1053.5
	SD	318.0	394.1	431.9	420.3
	ICC	0.91	0.89	0.89	0.97
	CV%	10.6	12.2	12.8	8.6

Tableau 16 : Fiabilité de la force, de la vitesse et de la puissance fournies par la plateforme de force (FP), l'encodeur linéaire (LnT), l'accéléromètre (Acc), la méthode de Samozino (Sam) (Giroux et al., 2015)

IV.4. Utilisation de ces outils méthodologiques en escalade

Le Myotest a déjà été utilisé dans l'estimation de la puissance chez une population de grimpeurs. Cet accéléromètre présente l'avantage de pouvoir être fixé au sportif durant la traction (cf. figure 39). Les mesures relevées sont fiables et proches des valeurs fournies par une plateforme de force (Giroux et al., 2015). Il est fait le choix de l'utiliser afin d'analyser la relation force-vitesse-puissance chez des grimpeurs de haut niveau. Il aurait été néanmoins possible d'utiliser un transducteur linéaire dont Muñoz-López et al. (2017) se sont servis lors de leurs analyses du mouvement de la traction.

– Résumé –

De nombreux outils scientifiques permettent d'analyser la relation force-vitesse-puissance tels que des plateformes de force, des accéléromètres, etc… . Le Myotest est un outil déjà utilisé dans une précédente étude chez des grimpeurs. Des études s'étant intéressées à la fiabilité et la précision du Myotest démontrent que cet outil est fiable malgré qu'il puisse légèrement surestimer les mesures de force, de vitesse et de puissance. Par ailleurs, il est également possible d'utiliser une méthode computationnelle en ne prenant que quelques paramètres clés sans avoir besoin d'outils scientifiques afin d'analyser la relation force-vitesse-puissance sur des mouvements de types squat-jumps, par exemple. Ce type de méthode est très précis mais nécessite la validation d'un modèle. Il serait très intéressant de s'y intéresser plus précisément lors de futures études sur la relation force-vitesse-puissance sur le mouvement de la traction.

V. Méthodologie pour la mesure et l'analyse de la relation force-vitesse-puissance

Cette dernière partie présente les différents paramètres qui seront pris en compte dans l'analyse de la relation force-vitesse-puissance lors de notre étude.

V.1. Analyse des membres inférieurs et supérieurs

La relation force-vitesse-puissance a beaucoup été analysée au niveau des membres inférieurs sur des gestes de types squat jump (Samozino et al., 2008), de sprint ou encore de pédalage. Au niveau des membres supérieurs, certains auteurs se sont intéressés au développé couché (García-Ramos et al., 2016). Néanmoins, un seul auteur s'est intéressé à la relation-force-vitesse-puissance sur le mouvement de la traction (Muñoz-López et al., 2017). Le peu d'étude sur ce type de mouvement peut s'expliquer par une raison très simple liée à la masse du système mesuré (athlète et charge additionnelle). La force externe qu'est capable de produire un sportif avec ses membres inférieurs est plus élevée que celle produite avec ses membres supérieurs. De plus, la charge additionnelle rajoutée aura un impact très important, afin de faire varier la production de force externe.

V.2. Mouvement balistique *versus* mouvement non balistique

Le type de mouvement analysé est également un facteur important ayant un impact sur la relation force-vitesse-puissance. Il existe des mouvements de type balistique où il y a projection du système étudié, comme par exemple le développé couché où le sportif en fin de contraction lance la barre (García-Ramos et al., 2016). Il existe également les mouvements non balistiques où il n'y a pas de projection du système comme par exemple le squat. Une étude de Garcia Ramos et al (2016) compare ces deux types de mouvements sur le développé couché. Les résultats suggèrent tout d'abord, quel que soit le type de mouvement, une relation linéaire avec des valeurs de régressions linéaires intéressantes ($R^2 > 0,99$). Le développé couché non balistique engendre une pente de la courbe plus importante ($3,62 \pm 0.84$ N.s.m^{-1}.kg^{-1} contre $3,21 \pm 0,56$ N.s.m^{-1}.kg^{-1}) alors que le développé couché balistique induirait un V0 ($2,51 \pm 0,33$ m.s^{-1} contre $2,82 \pm 0,28$ m.s^{-1}) et une puissance plus importante ($5,53 \pm 1,03$ W.kg^{-1} contre $6,36 \pm 1,17$ W.kg^{-1}). Ces résultats ne sont pas étonnants car lors d'un mouvement non balistique, le sportif ralentit son mouvement afin de ne pas lâcher la barre et terminer le mouvement en atteignant la vitesse nulle.

Par conséquent, la modalité de l'exercice aura une incidence sur la relation force-vitesse-puissance. Néanmoins, dans le cadre de tractions, il s'avère difficile de faire un mouvement balistique notamment avec une charge additionnelle importante pour des raisons de sécurité de l'athlète.

V.3. Paramètres mesurés

Quel que soit l'outil méthodologique utilisé, un mouvement sportif est généré par une production de force qui engendre de la vitesse. Ci-dessous sont présentées plusieurs courbes typiques de vitesses et de forces lors de différents mouvements (cf. figure 51). Il y a une augmentation de la vitesse en fonction du temps jusqu'à atteindre un pic avant une diminution. La différence se fait au niveau du mouvement lui-même, à savoir s'il est balistique ou non, et s'il y a une phase de contremouvement pour la préparation du jump.

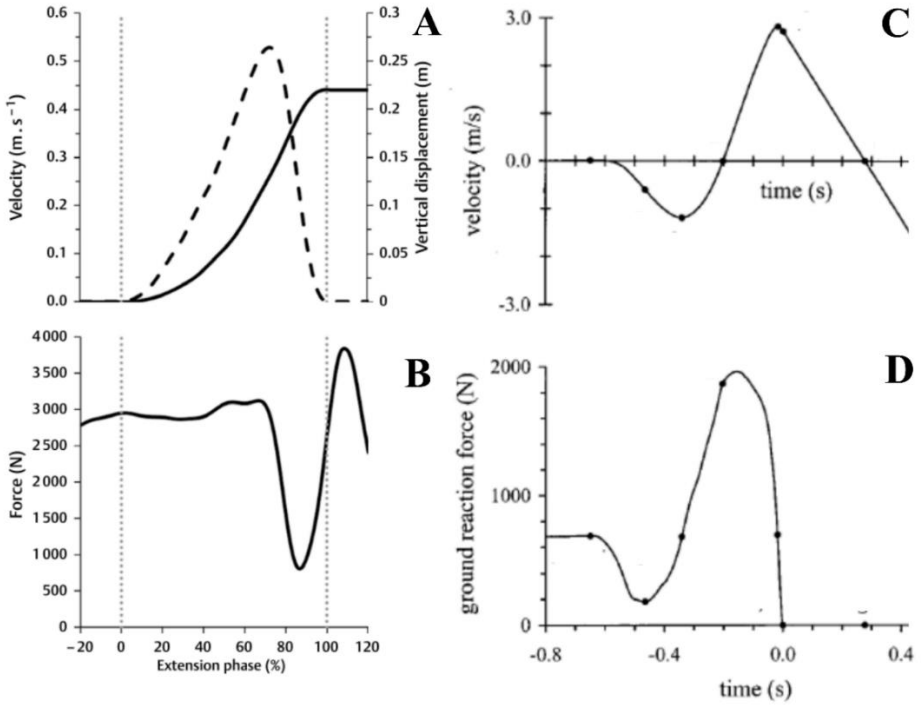


Figure 51 : Exemple de courbes typiques de vitesse et de force lors d'un squat (A et B) et d'un contremouvement jump (C et D)
[(Rivière et al., 2017) ; (Linthorne, 2001)].

Il est néanmoins possible de se poser la question sur le choix de mesure au niveau de la vitesse. En effet, certains auteurs vont analyser des valeurs instantanées qui donnent des informations sur la valeur du paramètre à un instant spécifique du mouvement (angle particulier du mouvement ou instant du décollage du sol). Il est possible d'analyser le pic de

vitesse (García-Ramos et al., 2016), c'est-à-dire le point culminant de la courbe de la vitesse. D'autres auteurs vont préférer analyser la vitesse moyenne (Samozino et al., 2008), en mesurant donc l'évolution de la vitesse sur la totalité du mouvement. Ce choix est encore débattu dans la littérature scientifique [(Vandewalle et al., 1987) ; (Dugan et al., 2004)]. Néanmoins, dans le cadre d'un mouvement poly-articulaire il semble plus intéressant d'analyser la capacité du groupe musculaire à produire de la vitesse sur toute la durée du geste.

Certains auteurs vont comparer des productions de forces absolues (N) [(Rivière et al. 2017) ; (Rahmani et al., 2017)] alors que d'autres vont s'intéresser à la force rapportée à la masse de l'athlète ($N.kg^{-1}$) (Morin et Samozino, 2016). Dans le cadre de comparaisons entre des sportifs, il semble davantage pertinent de rapporter la production de force externe à la masse de l'athlète. En effet, les charges additionnelles sont liées à la masse de l'athlète (30% de charge additionnelle par exemple). Il est donc plus intéressant de regarder la force rapportée à la masse et non la force absolue qui pourrait biaiser les comparaisons.

V.4. Choix au niveau des charges additionnelles : relation avec le 1-RM

Les études proposent une disparité importante concernant les charges additionnelles utilisées. Certains auteurs choisissent des charges additionnelles élevées proches du 1-RM (Muñoz-López et al., 2017) alors que d'autres choisissent un nombre de charges à tester, allant de 30% à 90% au niveau des charges additionnelles [(Jiménez-Reyes et al., 2017) ; (Banyard et al., 2017). Afin d'avoir une relation la plus représentative possible des capacités mécaniques du muscle, il est important d'avoir un nombre de charges testé suffisant.

Au niveau du la régression linéaire, il est important que ce coefficient soit le plus proche possible du chiffre 1[6] [(Samozino et al. 2014) ; (Sreckovic et al. 2015)]. Plus la pente de la relation force-vitesse est proche de chaque point tracé entre la force et la vitesse, plus la relation est précise.

Enfin, au niveau du lien entre la relation force-vitesse-puissance et le 1-RM, les auteurs s'opposent.

[6] Compris entre 0 et 1, une relation force-vitesse fiables induit un r^2 compris entre 0.90 et 0.99

En effet, Muñoz-López et al. (2017) montrent qu'il y a une corrélation importante entre F0 et le 1-RM (r = 0,81). Une autre étude de Jidovsteff et al. (2011) propose d'ailleurs une formule permettant de trouver le 1-RM à partir de la relation force-vitesse telle que :

$$1\,RM = (0{,}871 * LD0) - 0{,}624$$

avec LD0 qui peut être défini comme étant la production de force maximale théorique à vitesse nulle, soit F0.

Une récente étude de Rivière en 2017, s'intéresse à la position du 1-RM sur la relation force-vitesse sur un test de squat jumps. Après avoir mesuré ce 1-RM sur un test de squat, les athlètes réalisent des squats jumps avec différentes charges additionnelles (0% à 100% de la masse corporelle) permettant alors de tracer un profil force-vitesse. Les résultats montrent que cette répétition maximale serait sur la relation force vitesse, la valeur du 1-RM (0,22 ± 0,05 $m.s^{-1}$) étant environ 16% supérieur à la valeur fournie par la plus haute charge du squat jump mais 11% inférieur de F0. Bien que corrélées, les valeurs entre F0 et 1-RM ne sont pas identiques. La figure ci-dessous illustre la relation entre 1-RM et F0 (cf. figure 52).

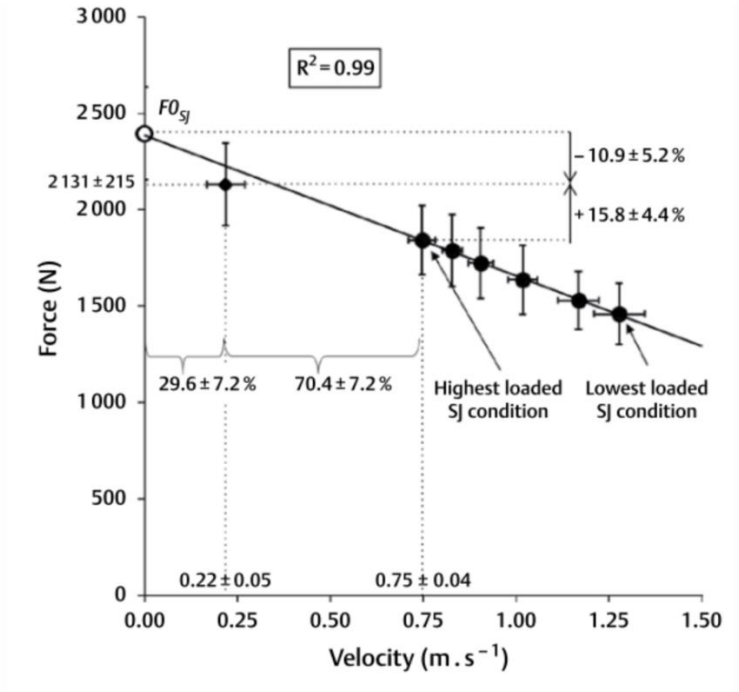


Figure 52 : Relation force-vitesse obetnue à la suite du test du *Squat Jump* (points noirs) par rapport à la condition du 1-RM (losange noir)

(Rivière et al., 2017)

Néanmoins, Banyard et al. (2017) montrent une différence très importante entre le 1-RM prédit par la relation force vitesse et le 1-RM réel. Le 1-RM prédit, est dans le cas présent, surestimé. Celui-ci explique cette différence au niveau de l'appareil utilisé, étant un appareil de développé couché guidé, engendrant alors des frottements spécifiques. De plus, Jidovsteff et al. (2011) demandent au sportif de ne réaliser uniquement la phase concentrique sans la phase excentrique au niveau du 1RM et des répétitions, afin de minimiser le SSC (*stretch shortening cycle* ou cycle étirement raccourcissement). Banyard et al. (2017) quant à eux défendent l'idée que le 1-RM et les répétitions doivent être mesurées en utilisant ce SSC pour une meilleure validité écologique. De plus, les athlètes seraient plus proches de leur répétition maximale qu'en condition normale.

En conclusion, si le 1-RM est lié à la relation force-vitesse, il semble donc que les conditions d'exercices aient un impact important sur les résultats produits.

– Résumé –

La relation entre la force et la vitesse sur des mouvements poly articulaires a été analysée sur des mouvements impliquant les membres inférieurs et supérieurs. Toutefois, une seule étude s'est intéressée au mouvement de la traction. Des mouvements balistiques et non balistiques peuvent être utilisés. Néanmoins le mouvement non balistique minimise les qualités de vitesse. Il est possible d'utiliser soit le pic de vitesse ou la vitesse moyenne. L'analyse de la vitesse moyenne est davantage pertinente dans le cadre de la compréhension d'un geste sportif. De plus il est possible d'analyser soit la force absolue soit celle rapportée à la masse de l'athlète. Si l'objectif de l'étude est de comparer des résultats entre des sportifs il semble que rapporter la force à la masse de l'athlète soit plus intéressant. Enfin, au niveau des charges additionnelles, proposer des charges très différentes les unes des autres permet une meilleure relation force-vitesse-puissance. Si de nombreuses études montrent que le 1-RM est lié à la relation force vitesse, les conditions d'exercices ont un impact sur les résultats produits.

VI. Choix méthodologiques dans l'analyse de la relation force-vitesse-puissance en escalade

Ce chapitre a montré que la relation force-vitesse-puissance permet d'avoir des paramètres objectifs (V0, F0, Pmax, etc…). Cette relation étudie la production de force externe à différentes vitesses. Les résultats fournissent des indications quant aux capacités mécaniques que le sportif peut produire. En outre, ces informations sont en lien avec la performance sportive. Il s'agit maintenant de présenter les choix faits quant au protocole méthodologique qui sera utilisé dans l'étude de la relation force-vitesse-puissance chez une population de grimpeurs de haut niveau.

Les contraintes méthodologiques utilisées sont donc :

- d'analyser la relation force-vitesse-puissance sur un mouvement poly-articulaire qui sera celui de la traction ;
- d'utiliser un Myotest présentant une bonne fiabilité et déjà utilisé sur la seule étude s'intéressant à la puissance développée par des grimpeurs ;
- de prendre comme critères de comparaisons entre les disciplines, les différents paramètres issus de la relation force-vitesse-puissance à savoir V0, F0, Sfv, Pmax ;
- d'analyser des productions de forces externes rapportées à la masse du grimpeur ;
- de calculer une vitesse moyenne et de ne pas s'intéresser au pic de vitesse ;
- de réaliser une traction non balistique, minimisant V0 mais indispensable pour des aspects sécuritaires ;
- de tester un nombre de charges additionnelles important afin d'obtenir la relation la plus précise possible.

Chapitre II : Etude de la relation force-vitesse-puissance chez des grimpeurs de haut niveau en bloc, difficulté et vitesse

Ce chapitre présente l'étude n°3 qui a été réalisée durant ce travail doctoral dont la version originale figure en annexe (*Annexe 4*). Des indications supplémentaires sont volontairement présentes dans la version présentée dans ce document afin de mieux débattre du travail réalisé.

L'objectif de cette étude est de comparer les capacités mécaniques de production de force externe des membres supérieurs entre des grimpeurs spécialistes en bloc, en vitesse et en difficulté et ce, à différentes vitesses de raccourcissement des fibres musculaires. Ces capacités ont été évaluées à l'aide de la relation force-vitesse-puissance lors d'un test de tractions lestées.

I. Méthode expérimentale

Cette première partie présente la méthode expérimentale utilisée lors de cette étude.

I.1. Présentation des participants

Un échantillon de 24 grimpeurs de haut niveau en escalade a été divisé en trois groupes : 11 spécialistes en bloc (âge = 26,3 ± 4,7 ans), 8 spécialistes en difficulté (âge =22,6 ± 5,5 ans) et 5 en vitesse (âge = 24,2 ± 5,5 ans).

L'ensemble de ces grimpeurs ont participé à des échéances de niveau international (Coupe du monde, Coupe d'Europe, Championnat d'Europe et Championnat du Monde) la saison précédente dans leur discipline respective. De plus, ils s'entrainent au moins 6 fois par semaine. Les grimpeurs de bloc ont un niveau de 8b bloc, cotation Fb ; 5.13d cotation YDS et un niveau de 28 cotation IRCRA. Les grimpeurs de difficulté ont un niveau de 8c, 5.14b cotation YDS et un niveau de 27 cotation IRCRA. Enfin, les grimpeurs de vitesse réalisent la voie de vitesse officielle (15 mètres de hauteur avec 5 degrés de dévers) en 6,28 ± 0,81 secondes (meilleur chronomètre en coupe du monde durant la saison 2017 – 2018). Aucun de

ces grimpeurs ne doit souffrir de blessures au niveau des membres supérieurs sur ces dix derniers mois.

I.2. Procédure de la démarche expérimentale

I.2.a. Echauffement

Tous les participants réalisent les essais durant la même période de la journée (10h) afin de limiter l'influence des variations circadiennes. Les grimpeurs reçoivent l'instruction de ne pas boire de café ou d'alcool durant les 12 heures précédant l'étude, mais ils peuvent boire de l'eau. L'ensemble des données anthropométriques, à savoir la taille (cm), la masse corporelle (kg), le pourcentage de matière grasse (%), l'envergure des bras (cm), l'APE index (rapport entre la taille des bras et la taille du sportif) et enfin la longueur bi-acromiale sont mesurés avant la session.

Chaque participant suit le même échauffement durant 20 minutes. Il grimpe sur la même structure, commençant par des mouvements à faible intensité avant de terminer par des mouvements à haute intensité. Après cela, il réalise trois tractions avec différents pourcentages de charge additionnelle (10%, 20% et 40%) avec 3 minutes de récupération entre chaque répétition.

I.2.b. Procédure expérimentale

Concernant la procédure expérimentale, chaque grimpeur réalise deux tractions explosives lestées à différents pourcentages de leur masse corporelle (+0%, +30%, +45%, +60% et +70% de leur masse corporelle) pour un total de 10 tractions. Entre chaque répétition, un temps de récupération est fixé à 3 minutes, afin de limiter les effets liés à la fatigue. Les tractions sont volontairement réalisées dans le désordre.

Concernant la position, le grimpeur tient la barre de traction (40 mm de diamètre), mains en pronation espacées d'une longueur égale à 1,5 fois leur longueur bi-acromiale. Les pieds ne touchent pas le sol et les épaules restent tendues avant le signal du début du test.

Au bip sonore, les participants doivent réaliser une traction verticale le plus rapidement possible. La traction est validée seulement si le menton dépasse la barre de la traction. La position est maintenue pendant 1 seconde afin de garantir une immobilité et le grimpeur peut ensuite descendre. Si ces conditions ne sont pas respectées, l'essai n'est pas

comptabilisé et l'athlète doit recommencer. Une illustration du test est présentée (cf. figure 53).

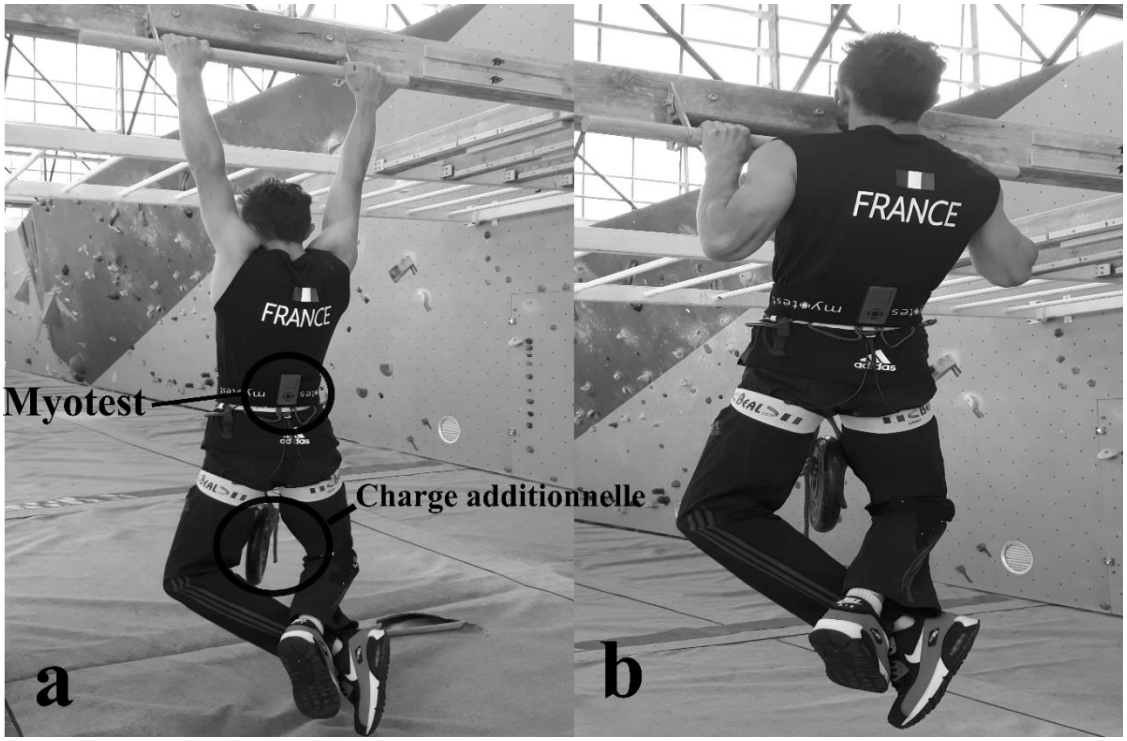


Figure 53 : Illustration du test. (a) représente la position de départ, (b) la position finale.

I.3. Méthodologie

Un accéléromètre tri-dimensionnel (Myotest, Sion, Switzerland, Fréquence = 500 Hz) est fixé sur une ceinture située juste au-dessus du baudrier dans la zone lombaire.

Le départ du mouvement est déterminé lorsque l'accélération verticale dépasse 0.10 $m.s^{-2}$. La fin du mouvement est caractérisée lorsque la vitesse est de 0 $m.s^{-1}$, c'est-à-dire lorsque le grimpeur finit la traction et reste immobile, le menton au-dessus de la barre. Seulement la partie ascendante de la traction est prise en compte dans cette étude.

Les données enregistrées par l'accéléromètre sont stockées pendant la procédure expérimentale puis transférées au logiciel Myotest ProSoftware, (version 1.3.2). La vitesse verticale instantanée (V) du centre de masses est obtenue après avoir intégré l'accélération avec une vitesse initiale de 0 $m.s^{-1}$. L'accélération est utilisée à chaque instant afin de calculer la force $F = m * a$ (in $N.kg^{-1}$); m étant la masse du grimpeur avec la charge additionnelle. La puissance instantanée est le produit de la force et de la vitesse à chaque instant avec $P = F * V$ ($W.kg^{-1}$). La force moyenne, la vitesse et la puissance de chaque essai sont calculées en tant

que moyenne de la force instantanée, de la vitesse et de la puissance pendant la partie ascendante de la traction.

Les relations force-vitesse et vitesse-puissance sont décrites par la régression linéaire des moindres carrés en utilisant l'essai avec la vitesse moyenne maximale pour chaque condition [(Samozino et al. 2012) ; (Jiménez-Reyes et al., 2014)]. Les courbes F – V sont extrapolées afin d'obtenir le F0 ($N.kg^{-1}$) et le V0 ($m.s^{-1}$), correspondant respectivement aux intersections de la courbe avec les axes force (ordonnée) et vitesse (abscisse). Le profil F – V a été calculé comme la pente de la relation linéaire F – V (Sfv, en $N.s.kg^{-1}.m^{-1}$). Les valeurs de puissance maximale (Pmax, en W or $W.kg^{-1}$) sont déterminées à partir de $Pmax = F0 * V0/4$ (Samozino et al., 2012). Cette Pmax est comparée à la puissance (P) développée par l'athlète durant la traction sans charge additionnelle. Cela permet d'évaluer si les grimpeurs sont capables de développer leur puissance maximale à leur propre masse corporelle.

– Résumé –

Une analyse force-vitesse-puissance est issue d'un test composé de tractions lestées. Un échantillon de 24 grimpeurs de haut niveau, divisé en trois groupes (bloc, difficulté, vitesse) réalise deux tractions explosives lestées à différents pourcentages de leur masse corporelle (+0%, +30%, +45%, +60% et +70% de leur masse corporelle) pour un total de 10 tractions. La mesure de l'accélération et de la force est enregistrée à chaque instant avec l'aide d'un Myotest. L'intégration de cette accélération permet d'obtenir la vitesse. Il est fait le choix de mesurer une vitesse, une force et une puissance moyenne durant la partie ascendante de la traction. La relation force-vitesse-puissance permet d'obtenir des paramètres tels que le V0, le F0, la Pmax, Sfv qu'il convient de comparer en fonction des différentes spécialités sportives.

II. Analyses statistiques

Toutes les données sont présentées en moyenne ± écart type. La normalité et l'homogénéité de la variance sont vérifiées avant l'analyse à l'aide du test de Shapiro-Wilk et du test de Brown-Forsythe. Les tests statistiques sont traités à l'aide du logiciel STATISTICA (version 10, StatSoft, Inc., Tulsa, USA).

Afin d'évaluer la fiabilité de F et de V, le coefficient de corrélation intraclasse (ICC) et le coefficient de variations (CV, exprimée en%) sont calculés entre les deux essais dans chaque condition sur les valeurs moyennes de F et de V quantifiées lors de la traction. En ce qui concerne la fiabilité des mesures, Atkinson et Nevill (1998) ont montré qu'un ICC> 0,8 et un CV < 10% garantissent une excellente fiabilité (Atkinson et Nevill, 1998).

Pour évaluer la différence entre les trois groupes, une analyse de variance à 1 facteur est réalisée (ANOVA) à l'aide d'un test de Post-Hoc de Tukey. Le seuil de significativité est fixé à $p < 0,05$ et la taille de l'effet (η^2) est définie comme petite pour $\eta^2 > 0,01$, moyenne pour $\eta^2 > 0,09$ et grande pour $\eta^2 > 0,25$ (Cohen, 1988). Pour chaque résultat, la puissance observée (β) est calculée.

III. Résultats

Les résultats issus de cette étude sont présentés dans cette partie. Après avoir montré qu'il y a de légères variations anthropométriques entre les trois groupes, il s'agira de montrer que les mesures issues de la relation force-vitesse-puissance mettent en avant d'importantes différences entre ces 3 groupes.

III.1. Résultats sur les données anthropométriques

Les données anthropométriques (masse corporelle, pourcentage de matière grasse, IMC) sont mesurées à l'aide d'une balance à impédance (utilisée pour l'étude 1 et 2). L'ensemble de ces données est présenté dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 17).

	Masse (kg)	Pourcentage de matière grasse (%)	Taille (cm)	Envergure (cm)	APE index	Longueur bi acromial (cm)
Bloc	64,85 ± 3,00	7,43 ± 1,89	174,91 ± 4,23	180,50 ± 5,62	1,03 ± 0,02	33,11 ± 1,25
Difficulté	62,03 ± 3,96§	7,95 ± 2,39	174,00 ± 5,71	177,98 ± 8,23	1,02 ± 0,01	31,99 ± 1,87
Vitesse	68,94 ± 6,86	9,42 ± 1,82	177,60 ± 5,18	182,80 ± 4,40	1,03 ± 0,02	33,00 ± 2,37

Tableau 17 : Caractéristique anthropométrique des trois groupes.
§ représente une différence significative entre les grimpeurs de difficulté et de vitesse ($p < 0.05$).

Une seule différence significative de la masse est observée entre les trois groupes, $F(2.21) = 3,99$, $p=0,034$ avec $\eta^2=0,28$ et $\beta=0.65$. Le test de post Hoc de Tukey révèle que les grimpeurs de vitesse ont une masse significativement plus élevée que les grimpeurs de difficulté (+ 10,03%). Ces valeurs sont proches d'autres études concernant des grimpeurs élites et de haut niveau [(López-Rivera et González-Badillo, 2012) ; (Ryepko, 2013b)].

III.2. Résultats sur la relation force-vitesse-puissance

Les variations du signal de la vitesse pour les charges de 0%, 45% et 70% sont présentées ci-dessous (cf. figure 54). Le temps mis pour réaliser la phase ascendante de la traction augmente avec la charge. De plus, les signaux sont différents entre les trois groupes, particulièrement dans la phase initiale de la traction. Pour les grimpeurs de bloc et de

difficulté, à 0% de la charge additionnelle, la vitesse semble augmenter de manière presque linéaire jusqu'à la vitesse instantanée maximale ; alors que pour les grimpeurs de vitesse, une légère décélération est observée après le début de la traction. Puis cette dernière augmente pour atteindre sa vitesse maximale.

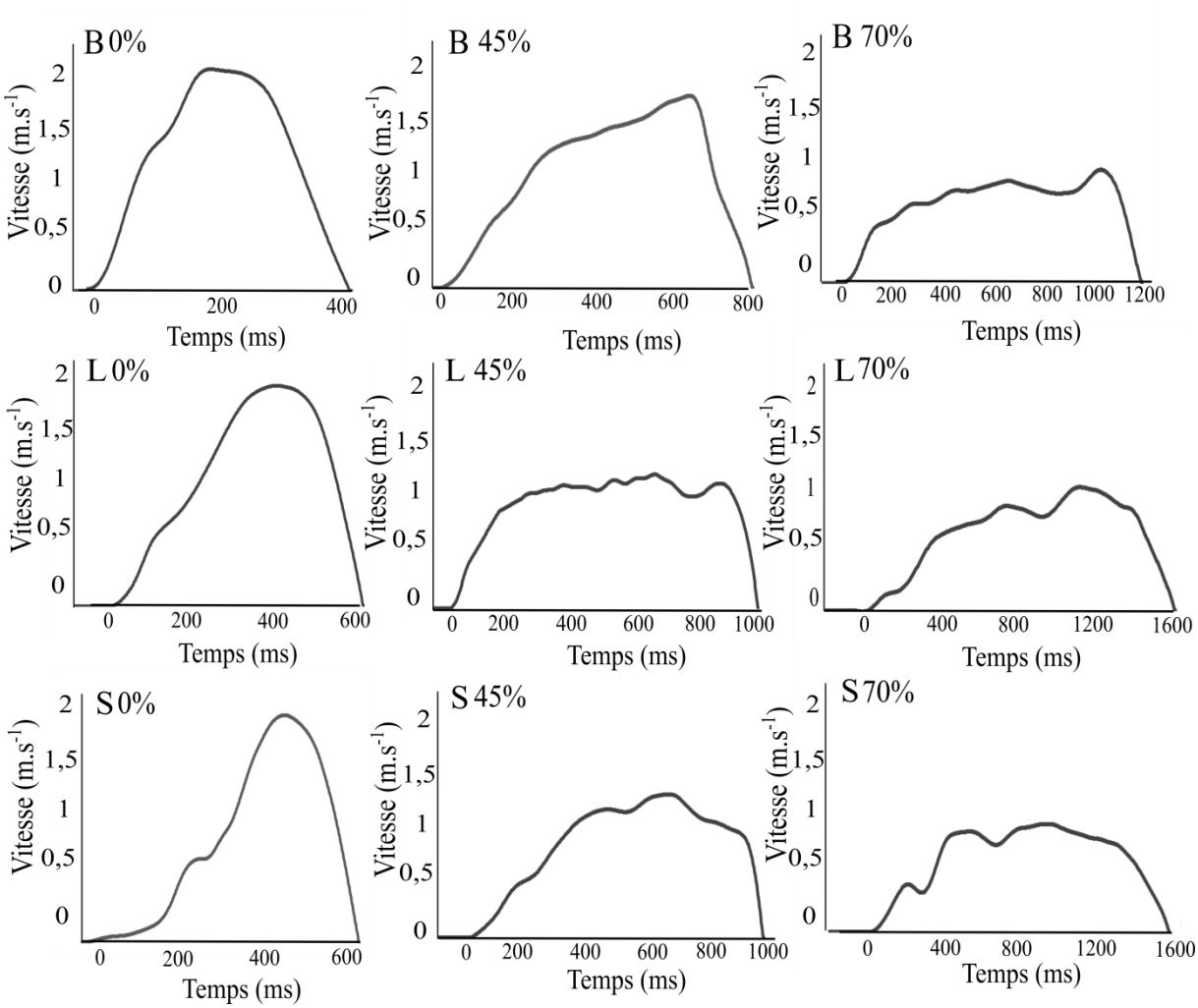


Figure 54 : Représentation graphique d'un signal typique des grimpeurs de bloc (B), des grimpeurs de difficulté (L) et des grimpeurs de vitesse (S) à 0%, 45% et 70% des charges additionnelles.

Le signal typique de la relation force - vitesse durant le mouvement d'une traction est présenté ci-dessous (cf. figure 55).

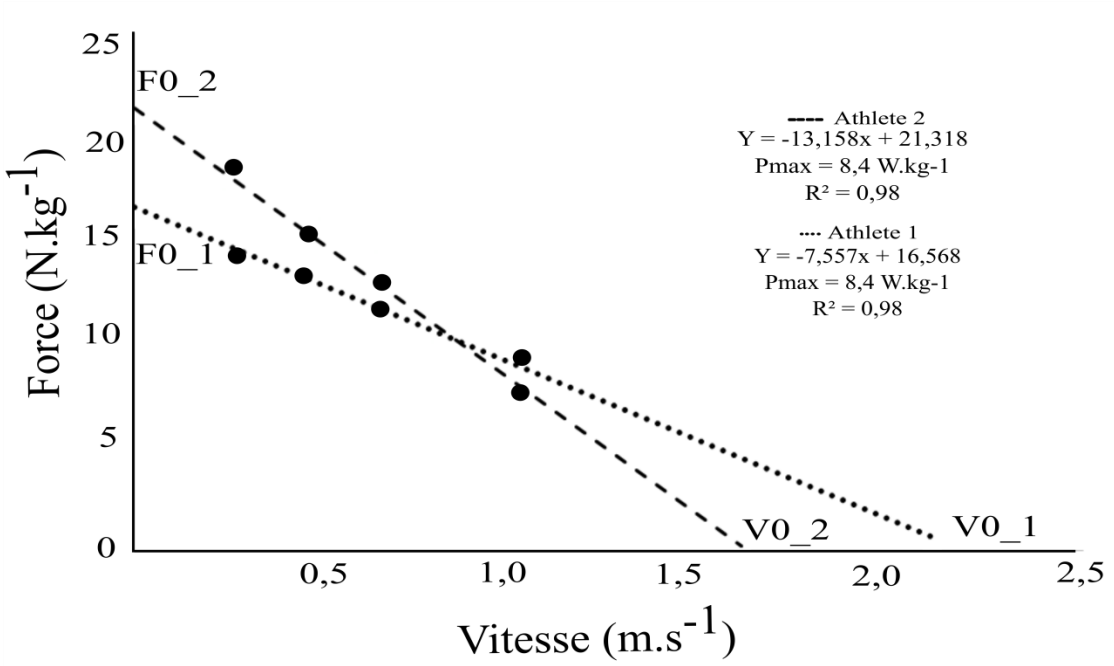


Figure 55 : Relation typique de la relation F-V entre deux athlètes (1 et 2). L'athlète 1 présente un F0 plus élevé avec un V0 plus faible comparé à l'athlète 2 pour une Pmax similaire.

Concernant la fiabilité, les valeurs ICC et CV de la force moyenne et de la vitesse moyenne ; ont été répertoriées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 18). La force varie de 9,92 ± 0,79 N.kg^{-1} à 17,38 ± 2,22 N.kg^{-1}; le CV de 1,00% à 6,18% et le ICC de 0,98 à 0,99. La vitesse varie de 0,38 ± 0,12 m.s^{-1} à 0,93 ± 0,109 m.s^{-1}; le CV de 2,75% à 6,62% et les ICC de 0,84 à 0,95.

	Vitesse moyenne (m.s^{-1})			Force (N.kg^{-1})		
Pourcentage de charge additionnelle (%)	Valeurs moyennes	ICC	CV (%)	Valeurs moyennes	ICC	CV (%)
0	0,93 ± 0,19	0,88	6,62	9,92 ± 0,79	0,99	1,82
30	0,69 ± 0,11	0,86	3,49	12,94 ± 1,11	0,99	1,00
45	0,56 ± 0,14	0,84	5,37	14,39 ± 1,18	0,99	6,18
60	0,46 ± 0,15	0,94	2,91	15,78 ± 1,26	0,99	4,59
70	0,38 ± 0,12	0,95	2,75	17,38 ± 2,22	0,99	1,30

Tableau 18 : Moyenne des coefficients de corrélations intraclasses (ICC) et des coefficients de variations (CV) pour les vitesses et forces moyenne en fonction des différents pourcentages de charges additionnelles (0%, 30%, 45%, 60% et 70%).

Les relations individuelles du profil force-vitesse sont cohérentes avec les régressions linéaires (R^2 compris entre 0,93 et 0,99) avec une valeur moyenne de 0,98 ± 0,02 pour les grimpeurs de bloc, 0,95 ± 0,02 pour les grimpeurs de difficulté et 0,98 ± 0,01 pour les grimpeurs de vitesse. Les variables issues de la relation force-vitesse-puissance pour les trois groupes sont présentées ci-dessous (cf. tableau 19).

	F	p	η^2	β	Grimpeurs de bloc	Grimpeurs de difficulté	Grimpeurs de vitesse
Pente	F(2.21) = 4,50	0,024*	0,30	0,71	-10,48±2,24§	-14,17±3,49	-12,27±1,73
V0 (m.s-1)	F(2.21) = 7,82	0,003*	0,43	0,92	2,09±0,36§ α	1,59±0,24	1,64±0,24
F0 (N.kg-1)	F(2.21) = 0,06	0,94	0,01	0,06	21,23±1,87	21,81±2,67	19,81±1,31
Pmax(W.kg-1)	F(2.21) =10,64	0,001*	0,50	0,98	11,03±1,56§ α	8,57±1,09	8,13±1,48
P (W.kg-1)	F(2.21) = 11,89	0,001*	0,53	0,99	10,73±1,43§ α	8,21±1,00	8,01±1,43

Tableau 19 : Moyenne et écart type des résultats des paramètres issus de la relation force- vitesse-puissance en fonction des groupes.

* Quand différence significative (p < 0,05)

§ Quand différence significative avec les grimpeurs de difficulté (p < 0,05)

α Quand différence significative avec les grimpeurs de vitesse (p < 0,05)

Le test de post-hoc de Tukey a révélé une différence significative entre les grimpeurs de bloc et de difficulté pour Pmax (p < 0,01), Sfv (p < 0,05), V0 (p < 0,01), P (p < 0,01) et entre grimpeurs de vitesse pour Pmax (p < 0,05), V0 (p = 0,01) et P (p < 0,01).

Une différence moyenne de 2,80 ± 0,24% entre Pmax est enregistrée pour les trois groupes (2,72 ± 0,21% pour les grimpeurs de bloc, 4,20 ± 0,25% pour les grimpeurs de difficulté et 1,48 ± 0,09% pour les grimpeurs de vitesse).

IV. Discussion

Après avoir présenté les résultats issus de cette étude, il s'agit maintenant de discuter et de montrer que chacune des disciplines présentent des caractéristiques spécifiques.

IV.1. Fiabilité du test

En ce qui concerne la fiabilité du test, la moyenne des ICC est de 0,89 pour la vitesse et de 0,99 pour la force. La moyenne des CV est de 4,23% pour la vitesse et de 2,98% pour la force. Ces résultats sont conformes aux précédentes études utilisant des accéléromètres et qui montrent un CV de 4,2% pour la force et de 8,2% pour la vitesse, lors d'un test de squat jump (Giroux et al., 2015). Atkinson et Nevill (1998) ont montré qu'un ICC supérieur à 0,8 et qu'un CV inférieur à 10% garantissent une excellente fiabilité. La méthode utilisée pour tester la capacité de production de force lors des exercices de traction apparaît donc comme étant très fiable. La pente de régression linéaire montre que le R^2 se situe entre 0,93 et 0,99. Ce résultat est similaire aux études précédentes menées sur les membres inférieurs [(Samozino et al., 2008) ; (Samozino et al., 2014)] et supérieurs (Muñoz-López et al., 2017). Cela confirme la qualité de la relation linéaire entre la vitesse et la force externe produite lors d'une traction.

IV.2. Interprétations de Pmax et de V0

En ce qui concerne la Pmax, une différence significative est montrée entre les grimpeurs de bloc comparativement aux grimpeurs des deux autres disciplines (11,03 ± 1,56 $W.kg^{-1}$ contre 8,57 ± 1,09 $W.kg^{-1}$ et 8,13 ± 1,48 $W.kg^{-1}$). Les grimpeurs de bloc sont en mesure de produire une puissance maximale plus élevée en raison d'une meilleure capacité de production de force à vitesse importante en comparaison des autres disciplines. En effet, les spécialistes de bloc présentent des valeurs de V0 significativement plus élevées que les autres groupes (2,09 ± 0,36 $m.s^{-1}$ versus 1,59 ± 0,24 $m.s^{-1}$ et 1,64 ± 0,24 $m.s^{-1}$), révélant de nombreux indicateurs sur leur profil.

Les grimpeurs de difficulté ont besoin d'une force maximale élevée ainsi que de l'endurance au niveau des doigts et des bras [(Macleod et al., 2007) ; (Ozimek et al., 2017)]. Si la discipline de bloc demande aussi une force importante au niveau des doigts, elle est également caractérisée par de nombreux mouvements dynamiques (White et Olsen, 2010) et révèle par conséquent un profil demandant des qualités de production de force à vitesse rapide.

Par ailleurs, il existe également une différence significative entre les grimpeurs de bloc et de vitesse. Deux raisons peuvent expliquer cette différence. Premièrement, dans la discipline de vitesse, le déplacement du corps est en partie due aux membres inférieurs (Kozina et al., 2013). Or, ce test ne porte que sur les membres supérieurs, ce qui peut induire une sous-estimation de l'importance de la contribution des qualités de puissance spécifique au grimpeur de vitesse. Deuxièmement, tous les sportifs commencent avec les bras complètement tendus. Ils réalisent ensuite la montée le plus rapidement possible. Deux phases durant la traction sont identifiées : d'abord la descente de la scapula, et ensuite une adduction et une extension du bras couplées à la flexion du coude. Cependant en vitesse, les grimpeurs n'effectuent pas de mouvement sans vitesse en ayant les bras tendus à l'exception du départ, cela afin de limiter l'amplitude des mouvements et de conserver la vitesse durant l'ascension. A l'inverse, en bloc et en difficulté, de nombreux mouvements débutent en position bras tendus afin de maximiser l'amplitude. Les grimpeurs initient leurs mouvements sans vitesse et doivent produire une force importante avec une forte amplitude. Ces deux raisons peuvent expliquer la différence entre les performances des grimpeurs de bloc par rapport à celles des grimpeurs de vitesse. La capacité à produire des mouvements rapides dans les membres supérieurs semble être spécifique à l'escalade de bloc.

IV.3. Interprétation de F0

Concernant F0, aucune différence n'est observée pour les grimpeurs des trois groupes (entre 19,81 ± 1,31 $N.kg^{-1}$ et 21,23 ± 1,87 $N.kg^{-1}$). Ces valeurs sont supérieures à celles d'une autre étude mentionnée précédemment qui utilise la relation force-vitesse sur le mouvement de la traction (entre 14,8 ± 2,1 $N.kg^{-1}$ et 19,0 ± 2,6 $N.kg^{-1}$) (Muñoz-López et al., 2017). Cette différence peut s'expliquer notamment par le niveau d'expertise des athlètes. En effet, cette étude s'intéresse à des grimpeurs de haut niveau s'entrainant depuis de nombreuses années à la différence de l'autre étude.

Les résultats de F0 démontrent donc qu'un haut niveau de force semble nécessaire pour être un grimpeur de haut niveau, sans pour autant être discriminant entre les groupes.

IV.4. Interprétation de Sfv

Le profil force-vitesse est un rapport entre les capacités de production de force à basse et haute vitesse et est caractérisé par la pente de la courbe (Sfv) [(Samozino et al., 2012) ; (Samozino et al., 2014)]. Une différence significative a été montrée entre les grimpeurs de

bloc et de difficulté (-10,48 ± 2,24 contre -14,17 ± 3,49), la valeur de la pente étant plus faible pour les grimpeurs de bloc. Plus la pente descend rapidement, plus les capacités de production de force diminuent rapidement lorsque la vitesse de déplacement augmente. Par conséquent, les spécialistes de bloc ont un profil force-vitesse plus élevé, orienté vers des qualités de vitesse (c'est-à-dire une production de force à grande vitesse).

IV.5. Rapport entre Pmax et P

Ces différences au niveau de la relation force-vitesse-puissance ont induit une puissance élevée lors de la traction à poids de corps (sans charge additionnelle) avec une différence significative entre les grimpeurs de bloc et les 2 autres groupes. De plus, une différence moyenne de 2,80% entre le Pmax et le P moyen a été enregistrée pour les trois groupes. Par conséquent, la moyenne de la puissance développée à poids de corps est presque similaire à celle du Pmax. De récentes études se sont intéressées à la notion de charge optimale (Markovic et Jaric, 2007). En d'autres termes, à quelle charge, les athlètes développent leurs puissances maximales. Des études montrent que dans le cas du membre inférieur, la puissance maximale est développée à une charge égale ou très proche de la masse corporelle des sportifs (Markovic et Jaric, 2007). Ces auteurs font l'hypothèse que le système locomoteur est conçu pour déplacer sa propre masse corporelle et par conséquent fonctionne de manière optimale (Jaric et Markovic, 2009). Néanmoins, dans certaines activités où les sportifs travaillent régulièrement avec des charges additionnelles, il est possible de voir une charge optimale légèrement supérieure à leur masse corporelle (Thomas et al., 2007).

Nous montrons ici que les résultats apparaissent comme étant similaire au niveau du membre supérieur, ce qui n'avait pas encore été montré, à notre connaissance. De fait, les grimpeurs de haut niveau en escalade sont en moyenne, capables de développer leur puissance maximale lorsqu'ils mobilisent leur propre masse corporelle. Ces résultats doivent être analysés de façon plus approfondis mais si nous faisons le lien avec l'hypothèse de Jaric et Markovic de 2009, cela reviendrait à montrer que la pratique de l'escalade déplace la charge optimale vers la masse corporelle.

– Résumé –

Les résultats montrent une absence de différence au niveau de F0. La relation force-vitesse révèle une différence uniquement entre les grimpeurs de difficulté et de bloc. En revanche, les paramètres tels que V0, Pmax et P apparaissent comme étant significativement plus importants pour les grimpeurs de bloc, comparativement aux deux autres disciplines. Ces indications révèlent d'une part que les grimpeurs de bloc possèdent une puissance supérieure. D'autre part, ils sont capables de produire une force externe plus importante à la fois à vitesse élevée et à vitesse lente, à la différence des grimpeurs de difficulté et de vitesse. Enfin, la puissance maximale (Pmax) est similaire à la puissance développée à poids de corps. Cela montre que les grimpeurs de haut niveau sont en mesure de produire leur puissance maximale à poids de corps.

V. Limites de l'étude

De cette étude peut être relevée de nombreuses limites. Le Myotest est fixé à la ceinture dans la région lombaire. Pendant le mouvement de traction, la flexion des membres supérieurs induit un léger mouvement du centre de masse vers le bas tandis que le Myotest ne bouge pas. Par conséquent, l'accélération et la vitesse peuvent être légèrement surestimées. Cependant, les erreurs induites sont négligeables comme le démontre une étude sur le saut vertical dans lequel le même phénomène se produit pour les membres inférieurs qui sont plus lourds que les membres supérieurs (Samozino et al., 2008). Cela n'a donc pas eu d'impact sur les résultats de cette étude.

Deuxièmement, les grimpeurs spécialistes en vitesse sont peu nombreux ; cette pratique étant relativement récente et le mur officiel n'apparaissant qu'en 2007. Par conséquent, le nombre de participants en France est inférieur à celui de l'escalade de bloc et de difficulté. En outre, en voulant augmenter la taille de l'échantillon, il aurait été nécessaire de diminuer le niveau d'expertise. Il n'aurait été alors plus possible de comparer les trois groupes.

Il est possible de s'interroger sur le lien entre les paramètres issus du profil F – V (F0, V0 et Pmax) pour chaque athlète et leur performance en escalade. En effet, il est contestable d'énoncer que le niveau d'expertise en escalade s'explique uniquement par des paramètres issus du profil F – V. Des études montrent malgré tout que ce mouvement de traction est caractéristique du niveau des grimpeurs [(Ozimek et al., 2017) ; (Laffaye et al., 2016)] . Une solution serait de proposer le même protocole expérimental à des athlètes d'un niveau plus faible. Cependant, l'ajout de charge additionnelle engendrerait d'autres problématiques. En effet, pour que la relation soit la plus précise et caractéristique des capacités mécaniques de production de force externe, il est important d'avoir un nombre suffisant de points. Plus précisément, il est impératif de diversifier le nombre de charges additionnelles. Or, rapidement les sportifs sont limités par leur propre capacité mécanique à produire une force externe suffisante.

Une autre limite se trouve être le choix du mouvement analysé et plus précisément la condition. En effet, en proposant une traction non balistique et donc sans projection de charge, le grimpeur doit décélérer la fin du mouvement afin d'atteindre une vitesse nulle entrainant une sous-estimation des capacités de V0. Une solution serait de reprendre le mouvement du

« arm jump test » (Laffaye et al., 2014), qui utilise la traction balistique. Par ailleurs, il serait nécessaire de gérer un aspect sécuritaire, notamment lié à la chute du grimpeur avec une charge additionnelle.

Enfin, une dernière limite s'explique par la production de force externe du sportif. En effet, la première charge à déplacer est la masse corporelle du grimpeur. Dès lors, l'ajout de charge additionnelle induit forcément une baisse de la vitesse. Par conséquent, les points qui sont tracés lors de la relation force-vitesse-puissance ne représentent qu'un seul côté de la parabole de la puissance (cf. figure 56). D'ailleurs, la puissance à poids de corps (P) est intimement liée à la Pmax qui est le point de la parabole. Il serait intéressant de proposer également des tractions délestées afin d'avoir une relation plus précise et complète.

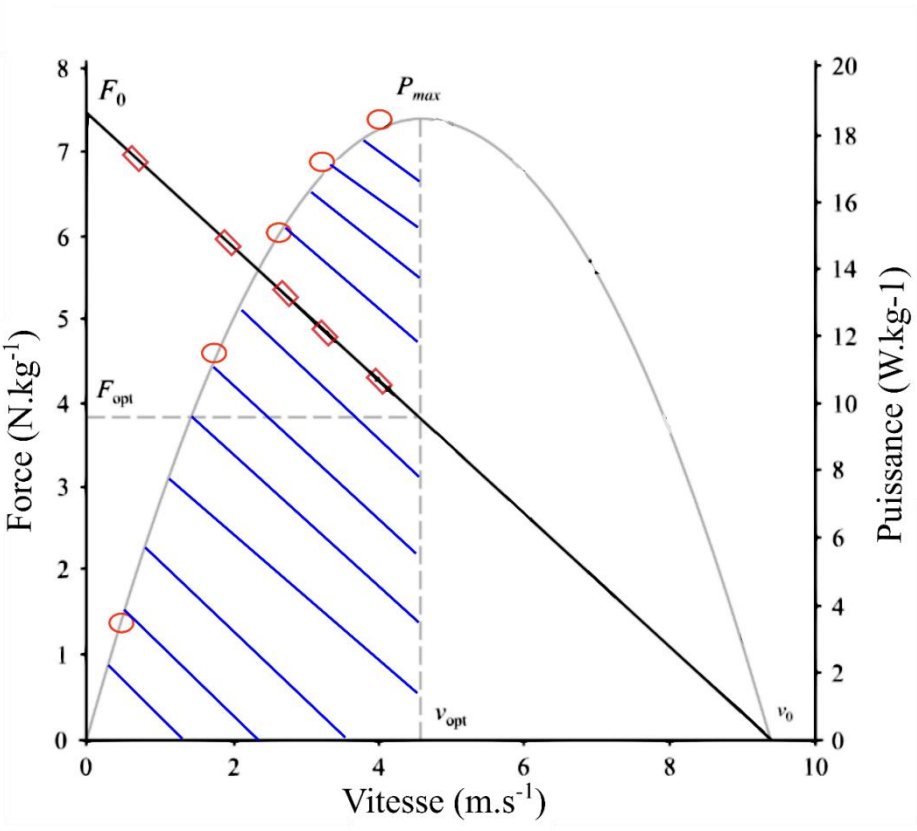


Figure 56 : Relations entre la production de force à différentes vitesses (rectangles) et points déduits sur la parabole (ronds). La zone en bleu correspond à la partie de la parabole analysée lors du test. (Cross et al., 2017)

VI. Application pratique et conclusion

VI.1. Application pratique

Il s'agit de la première étude qui utilise la relation force-vitesse-puissance pour tester la capacité de production de force externe sur des grimpeurs de haut niveau. Le but de cette étude est de comparer les différences et les similarités entre les grimpeurs de bloc, de difficulté et de vitesse sur un test de traction.

Dans le cadre d'un format olympique de type combiné, il semble que la spécialité la plus adaptée soit celle qui associe non seulement un haut niveau de force [(Ozimek et al., 2017) ; (Laffaye et al., 2014)] et d'endurance (Vigouroux et Quaine, 2006), mais également une puissance importante, en raison des mouvements dynamiques dans le bloc (White et Olsen, 2010). Un profil orienté «vitesse» capable de produire une force externe importante à grande vitesse semble plus approprié pour le format combiné. Par conséquent, il semble que le bloc soit la discipline la plus favorable aux Jeux olympiques de 2020 qui se dérouleront au Japon. D'autres études seraient nécessaires pour voir comment l'optimisation de ce profil F-V, en fonction d'un entrainement spécifique, est possible (Jiménez-Reyes et al., 2017).

VI.2. Conclusion

La capacité de production de force externe du grimpeur de haut niveau est évaluée lors d'un test de tractions lestées avec l'utilisation de la relation force-vitesse-puissance. La fiabilité de la méthode s'est avérée élevée. De plus, il y a de nombreuses différences significatives entre les grimpeurs de blocs et les grimpeurs de difficulté (Pmax, Sfv, V0 et P), et entre les grimpeurs de bloc et les grimpeurs de vitesse (Pmax, V0 et P).

Par rapport aux grimpeurs de vitesse et de difficulté, les grimpeurs de bloc produisent à la fois une production de force externe importante à vitesse lente et à vitesse rapide. Leurs qualités de puissance sont déterminantes dans leur discipline et permettent probablement une meilleure adaptation dans les autres disciplines d'escalade. Ces différences révèleraient un profil "vitesse" chez les grimpeurs de bloc, ce qui n'avait encore jamais été montré auparavant.

CONCLUSION GENERALE

Durant ce travail de thèse, les facteurs physiques influençant la performance en escalade ont été étudiés. Les facteurs qui déterminent le niveau d'expertise, et ceux qui sont spécifiques à chaque discipline (bloc, difficulté, et vitesse) ont été mis en lumière. Il s'agit maintenant de faire une synthèse de chaque étude en rappelant les principaux résultats.

La force maximale des muscles fléchisseurs des doigts est-elle discriminante du niveau en escalade ?

Un test de flexion maximale de doigts sur un dynamomètre électronique a été utilisé avec un protocole expérimental identique pour chaque participant. Deux préhensions ont été utilisées (tendue et semi tendue) car elles sont caractéristiques des préhensions présentes en escalade. Plusieurs groupes ont été testés (non grimpeurs, confirmés, internationaux).

Ces mesures ont montré que la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts apparaît comme étant un facteur fiable et reproductible. Les résultats révèlent qu'il existe bien des différences importantes entre les grimpeurs internationaux, confirmés et les non grimpeurs quelles que soient les préhensions. Si ces résultats ne permettent pas de différencier les sportifs de haut niveau entre eux, ils permettent de souligner l'importance de développer une force maximale importante. Par conséquent, la force maximale des muscles fléchisseurs des doigts est bien discriminante du niveau en escalade.

Le taux de développement de la force est-il un paramètre fiable et discriminant ?

Durant le même test, la capacité à produire de la force le plus rapidement possible a été analysée. Cet indicateur est appelé le taux de développement de la force (RFD). Les RFD contractiles à savoir le RFD_{50ms}, le RFD_{100ms}, le RFD_{200ms} et le $RFD_{95\%}$ ont été mesurés.

Une étude de la fiabilité a montré que seul le RFD_{200ms} est fiable quel que soit le niveau du grimpeur, les autres RFD présentant d'importantes fluctuations. La comparaison de ces paramètres en fonction du niveau d'expertise révèle que les grimpeurs internationaux possèdent un RFD_{200ms} supérieur aux grimpeurs confirmés et aux non grimpeurs. Ces spécificités révèlent qu'être en mesure de produire de la force rapidement est indispensable afin d'être performant en escalade. Ces différences peuvent s'expliquer à la fois en raison d'une différence au niveau de la structure des muscles sollicités (muscles fléchisseurs superficiels et profonds des doigts) mais également au niveau du facteur nerveux, notamment la fréquence de décharges des unités motrices. Enfin, il y a une corrélation entre la force maximale volontaire et le RFD. De récentes études de 2019 révèlent que le RFD influence cette production de force maximale (Del Vecchio et al., 2019b). En d'autres termes, si les grimpeurs cherchent à développer leurs forces maximales, ils doivent donc chercher à travailler également leur RFD, par conséquent à produire une force élevée le plus rapidement possible. La dimension temporelle de la production de force doit être travaillée.

La force maximale et le RFD peuvent-ils évoluer en fonction d'un entrainement spécifique ?

Une deuxième étude chez des sportifs de haut niveau a analysé l'évolution de la force maximale, le RFD_{200ms} et le $RFD_{95\%,}$ en fonction d'un entrainement spécifique. Les résultats montrent que le RFD_{200ms} est le seul indicateur sensible à l'entrainement. Il s'avère que l'amplification de la fréquence des décharges des unités motrices soit responsable de l'augmentation du RFD. De plus, il est à noter que des gains rapides et significatifs peuvent être mesurés en seulement 4 semaines. Dans l'optique d'un travail physique proche de compétitions importantes, il serait donc intéressant de développer le RFD.

Existe-t-il des différences au niveau de ces paramètres en fonction des spécialités sportives ?

Une étude suivant le même protocole expérimental a montré qu'il existe des différences de la force maximale et du RFD_{200ms} entre des grimpeurs internationaux en bloc et en difficulté. Les résultats montrent que ces grimpeurs de bloc sont en mesure de produire une force maximale ainsi qu'un RFD_{200ms} plus important que les grimpeurs de difficulté. Ces

affirmations confirment bien la notion de spécificité des facteurs physiques entre chaque discipline. Etant donné, l'évolution des compétitions d'escalade, notamment la part de mouvements dynamiques de plus en plus importants en difficulté, il serait possible de poser la question du travail spécifique du bloc en vue d'échéances de difficulté.

La production de force des muscles permettant le mouvement de la traction est également un facteur déterminant de la performance. Existe-t-il des différences en fonction des trois disciplines ?

Après s'être intéressé aux muscles fléchisseurs des doigts, une réflexion s'est portée sur la production de force des membres supérieurs à différentes vitesses sur le mouvement d'une traction. Il s'agit du premier travail qui s'est intéressé à la relation force-vitesse-puissance chez une population de grimpeurs.

L'analyse de cette relation, issue du mouvement de la traction à l'aide d'un accéléromètre, propose des résultats fiables chez une population de grimpeurs de haut niveau. Les résultats ont révélé de nombreuses différences significatives entres les grimpeurs de bloc comparés aux grimpeurs de difficulté et de vitesse. La production de force maximale théorique à vitesse nulle (F0) n'apparaît pas comme étant un facteur discriminant entre les 3 groupes. En revanche, la vitesse maximale théorique à force nulle (V0), la puissance maximale développée (Pmax) ainsi que la puissance produite à poids de corps (P) apparaissent comme étant discriminants entre les 3 groupes. Ces informations montrent que les grimpeurs de bloc sont en mesure de produire une force plus importante à vitesse rapide, sur l'amplitude totale d'une traction, à la différence des autres disciplines. On parle dans le cas présent de profil « orienté » vitesse.

La puissance maximale est-elle proche de la puissance développée à poids de corps ?

Les résultats montrent que la différence entre la puissance maximale théorique, calculée à partir du F0 (production de force maximale théorique à vitesse nulle) et du V0 (vitesse maximale théorique à force nulle) est très proche en moyenne de la puissance développée à poids de corps (différence de 2,80%). Ces propos sont très cohérents du fait que

l'activité sportive se pratique à poids de corps. Néanmoins, cela montre bien que les sportifs de haut niveau sont en mesure d'adapter leurs productions de force en fonction de leur masse corporelle.

Un travail devrait être réalisé sur des grimpeurs ayant un niveau d'expertise plus faible de façon à voir si la différence entre puissance maximale et puissance développée à masse corporelle est identique. Il est possible de faire l'hypothèse que cette capacité à développer sa puissance maximale à masse corporelle soit une spécificité des grimpeurs de haut niveau.

Quelle est la différence entre RFD, force maximale et puissance ? A quel point ces paramètres sont-ils dépendants les uns des autres ?

Il existe une différence importante entre ces trois termes. La force maximale correspond à la force qu'un muscle ou un groupe de muscles peut générer lors d'une contraction maximale ou d'un mouvement musculaire spécifique. Le RFD représente la capacité à produire de la force le plus rapidement possible. Il diffère de la puissance qui elle, analyse l'évolution de la production de force en fonction de la vitesse de raccourcissement des fibres. Algébriquement, la force maximale peut être évaluée en N, ou sans unité, si la force est normalisée. Le RFD est mesuré en $N.s^{-1}$. La puissance s'exprime en W ou $W.kg^{-1}$.

Prenons un exemple concret afin d'illustrer la dépendance de ces trois indicateurs. Lorsqu'un sprinteur réalise un 100 mètres, il doit, durant les 10 premiers mètres, être capable de produire une force très importante à vitesse « lente ». Lors de sa préparation, il aura donc tout intérêt à travailler sur de la production de force à vitesse réduite en augmentant sa force maximale. Puis à partir de 50 mètres, il devra être en mesure de continuer à produire une force élevée mais cette fois-ci à vitesse « rapide ». Dans ce contexte, le sportif devra alors travailler sur de la production de force mais cette fois-ci à grande vitesse.

De plus, le temps de contact au sol entre chaque foulée évolue en fonction du moment de la course. Une étude de 1997 montre que le temps de contact durant la première phase d'appui après le départ est compris entre 160 et 194 ms (Harland et Steele, 1997). A l'inverse, à 50 mètres, le temps de contact est de 94 ± 4 ms (Rabita et al., 2015). Par conséquent, lors du travail de préparation, l'athlète devra s'entrainer sur sa capacité à développer le plus de force durant ces temps impartis Le RFD prend alors tout son sens.

Ce n'est qu'en prenant en compte l'ensemble de ces facteurs et en les travaillant spécifiquement que la performance sera optimale.

Est-il possible que les spécificités révélées aient un impact quant à la préparation d'une compétition de type combiné, par exemple pour les JO de Tokyo en 2020 ou encore ceux de Paris en 2024 ?

L'ensemble de ces études montre bien que la discipline de bloc présente de nombreuses spécificités révélant un plus haut niveau de force des muscles fléchisseurs des doigts, ainsi qu'une capacité à produire de la force rapidement, comparativement aux deux autres disciplines. De plus, les grimpeurs de bloc sont en mesure de produire de la force à la fois à vitesse lente mais également à vitesse rapide.

Dans le cadre d'un combiné des trois disciplines aux Jeux Olympiques de 2020, il apparaît donc que le grimpeur spécialiste en bloc sera favorisé par rapport aux autres disciplines.

De plus, lors des Jeux Olympiques de 2024 à Paris, l'escalade s'articulera sous la forme d'un combiné des épreuves du bloc et de la difficulté, la vitesse étant à part. Les informations fournies dans ce travail doctoral montrent que l'entrainement en bloc doit être favorisé, notamment dans le combiné bloc et difficulté.

Quelles seraient les perspectives de futurs travaux de recherche ?

De nombreuses études peuvent être effectuées afin de poursuivre les travaux qui ont été jusqu'à maintenant menés. Il a été montré que le RFD est un facteur clef qui évolue à la suite de l'entrainement. Il serait intéressant d'analyser plus précisément ce phénomène utilisant de l'électromyographie de surface (EMG). Cela permettrait d'apporter davantage de réponses sur le niveau d'activation des muscles lors d'une flexion de doigts mais également dans la contribution de l'ensemble des muscles de la chaîne des membres supérieurs permettant cette flexion de doigts. En faisant ensuite évoluer le protocole expérimental comme le préconise Michailov et collaborateurs en 2018, il serait alors possible de comparer les résultats fournis entre ces deux protocoles.

Si nous analysons l'ensemble des études sur le RFD, très peu s'intéressent à une population de sportifs de haut niveau. Ce travail met en lumière une différence importante au niveau du RFD et ce en fonction du niveau d'expertise en tentant d'expliquer ces différences, notamment par des spécificités au niveau du système nerveux (augmentation de la fréquence de décharge des unités motrices). Néanmoins, dans le cas présent, nous interprétons des résultats issus de populations non expertes, engendrant donc des limites quant aux explications possibles au niveau de ces différences de RFD. Il serait pertinent de s'inspirer des protocoles expérimentaux développés par l'équipe de Del Vecchio en 2019. [(Del Vecchio et al., 2019a ; Del Vecchio et al., 2019b)] Cela apporterait de nombreuses indications quant à l'adaptation du membre supérieur chez l'humain à la suite d'une pratique intensive.

Un point important qui n'a pas été abordé durant ce travail doctoral serait de s'intéresser à l'effet de la fatigue sur ce RFD. En effet, l'escalade se caractérise par un effort avec des niveaux de productions de force très importants. Des auteurs tels que Vigouroux et Quaine en 2006 se sont intéressés à la baisse de la force maximale volontaire au niveau des muscles fléchisseurs des doigts lors d'un test intermittent avec 5 secondes d'efforts et 5 secondes de récupération (Vigouroux et Quaine 2006). Les auteurs comparent l'évolution de la force maximale développée en fonction des répétitions entre une population de grimpeurs élites et des non grimpeurs. Les résultats montrent que les grimpeurs sont en mesure de conserver une production de force supérieure à 80% plus longtemps que les non spécialistes. Une étude de Laffaye et collaborateurs de 2016 révèlent des résultats équivalents sur un test de répétitions de tractions balistiques (Laffaye et al., 2016). Par conséquent, les grimpeurs spécialistes gardent un niveau de force élevé plus longtemps que les non spécialistes. Dans le même sens, l'étude de 2006 met en avant la notion de "point de rupture". Il s'agit d'un point où le niveau de force produit par le grimpeur baisse prématurément avant de se stabiliser. Cela s'expliquerait par une ischémie importante au niveau des muscles de l'avant-bras, amenant alors à une perturbation de la circulation du liquide interstitiel (facilitant notamment le drainage des déchets). Cela engendrerait une accumulation des ions H+ [(Bigland-Ritchie et al., 1981 ; Enoka et Stuart, 1992)]

Ce point de rupture arriverait plus tardivement chez les grimpeurs élites que les non spécialistes. Il serait alors intéressant de voir l'évolution du RFD à la suite d'un effort intermittent et voir si, d'une part, cette zone de rupture arriverait au même moment que la baisse de la FMV. De plus il serait pertinent de comparer ce phénomène en fonction des disciplines sportives. Nous pouvons faire l'hypothèse que les grimpeurs de difficulté seraient

en mesure de conserver un niveau de force plus longtemps que les spécialistes en bloc. Il serait également intéressant de voir si un entrainement spécifique serait en mesure de retarder ce point de rupture.

Une étude de 2012 a montré que la force exercée par les muscles fléchisseurs des doigts varie en fonction de la préhension mais également en fonction de la taille de la prise (Amca et al., 2012). Plus la taille de la préhension est petite (< 2 cm) plus les différences de forces développées en fonction des préhensions sont importantes. En effet, en dessous de 2 cm, la force développée est significativement plus importante en préhension arquée qu'en préhension semi tendue ou en préhension tendue. Il semblerait alors pertinent de diminuer la taille de la prise d'escalade et de voir l'évolution du RFD.

Une étude de 2018 montre un lien entre le nombre de tractions effectuées et la taille de la préhension au niveau des doigts (Vigouroux et al., 2018). En effet, après avoir réalisé un nombre maximal de tractions sur une barre, la taille des prises a ensuite été réduite. Il en résulte une baisse du nombre de tractions que le sportif est capable de réaliser. Il apparaît donc que la force des bras soit limitée par la force que peut produire les muscles fléchisseurs des doigts. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de la taille de la prise sur la production de force des membres supérieurs à différentes vitesses. Plus précisément, il serait intéressant d'analyser l'évolution de la relation force-vitesse-puissance lors d'un test de tractions lestées sur différentes préhensions.

Les résultats montrent qu'en moyenne, la puissance maximale développée par les grimpeurs de haut niveau est très proche de leur puissance développée à poids de corps. Il serait pertinent d'analyser plus spécifiquement la notion de charge optimale, développée par Jaric et Markovic [(Markovic et Jaric, 2007 ; Jaric, 2015)], en testant notamment des non spécialistes. En effet, il serait possible de voir si une pratique intensive de l'escalade déplacerait la charge optimale vers la masse corporelle et engendrerait une adaptation du membre supérieur.

Le concept de profil optimal développé par l'équipe de Samozino en 2012 permettrait de répondre à la problématique de l'optimisation de la performance. Il s'agit d'une approche théorique qui évalue, pour une même capacité de puissance, un rapport / équilibre optimal entre les capacités de forces et de vitesse, afin d'optimiser la performance sportive (Samozino

et al., 2012). Il serait très intéressant de voir s'il serait possible de reproduire la même approche théorique, s'appliquant alors au membre inférieur.

Enfin, il a été montré dans ce travail de thèse qu'une méthode computationnelle a été validée pour le squat jump (Samozino et al., 2008) ainsi que pour le développé couché (Rahmani et al., 2017). Cette méthode permet de mesurer la relation force-vitesse-puissance sans avoir recours à une plateforme de force, Myotest, etc... mais avec uniquement certaines mesures (hauteur du centre de masses, hauteur maximale atteinte par le centre de masses, etc…). Ce type de méthode pourrait être réalisé en escalade sur la base du test du « arm jump test ». Les résultats fournis pourraient apporter de nombreuses indications aux entraineurs sur les capacités mécaniques de leurs athlètes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aagaard, P. 2003. “Training-Induced Changes in Neural Function.” *Exercise and Sport Sciences Reviews* 31(2):61–67.

Aagaard, P., J. Andersen, P. Dyhre-Poulsen, A. M. Leffers, A. Wagner, S. P. Magnusson, Jens Halkjær-Kristensen, and Erik B. Simonsen. 2001. “A Mechanism for Increased Contractile Strength of Human Pennate Muscle in Response to Strength Training: Changes in Muscle Architecture.” *Journal of Physiology* 534(2):613–23.

Aagaard, P., E. B. Simonsen, J. L. Andersen, P. Magnusson, and P. Dyhre-Poulsen. 2002. “Increased Rate of Force Development and Neural Drive of Human Skeletal Muscle Following Resistance Training.” *Journal of Applied Physiology* 93(4):1318–26.

Altman, D. G. and J. M. Bland. 1983. “Measurement in Medicine: The Analysis of Method Comparison Studies.” *The Statistician* 32(3):307–17.

Amca, A. M., L. Vigouroux, S. Aritan, and E. Berton. 2012. “Effect of Hold Depth and Grip Technique on Maximal Finger Forces in Rock Climbing.” *Journal of Sports Sciences* 30(7):669–77.

Amiridis, L. G., A. Martin, B. Morlon, L. Martin, G. Cometti, M. Pousson, and J. Van Hoecke. 1996. “Co-Activation & Tension-Regulating Phenomena during Isokinetic Knee Ext in Sedentary & Highly Skilled Humans.” *European Journal of Applied Physiology* 73:149–56.

Andersen, J. L. 2001. “Muscle Fiber Type Characteristics of the Runner.” *Running & Science. Copenhagen : Munksgaard* 49–65.

Andersen, L. L. and P. Aagaard. 2006. “Influence of Maximal Muscle Strength and Intrinsic Muscle Contractile Properties on Contractile Rate of Force Development.” *European Journal of Applied Physiology* 96(1):46–52.

Arazi, H., A. Rashidlamir, M. Z. Abolhasani, and S. A. Hosaini. 2018. “Profiling and Predicting Performance of Indoor Rock Climbers.” *Revista Brasileria de Cineantropometria & Desempenho Human* 20(1):82–94.

Arsac, L. M., A. Belli, and J. Lacour. 1996. “Muscle Function during Brief Maximal Exercise: Accurate Measurements on a Friction-Loaded Cycle Ergometer.” *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 74(1–2):100–106.

Atkinson, G. and A. M. Nevill. 1998. “Statistical Methods for Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine.” *Sports Medicine* 26(4):217–38.

Baláš, J., M. Panácková, J. Kodejška, D. Cochrane, and A. Martin. 2014. “The Role of Arm Position during Finger Flexor Strength Measurement in Sport Climbers.” *International Journal of Performance Analysis in Sport* 14(2):345–54.

Banyard, H.G., N. Kazunori, and G. G. Haff. 2017. “Reliability and Validity of the Load-Velocity Relationship to Predict the 1RM Back Squat.” *Journal of Strength and Conditioning Research* 31(7):1897–1904.

Banyard, H.G., K. Nosaka, A. D. Vernon, and G. G.Haff. 2017. “The Reliability of Individualized Load-Velocity Profiles.” *International Journal of Sports Physiology and Performance* 13(6):763–69.

Barry, B. K., G. E. Warman, and R. G. Carson. 2005. “Age-Related Differences in Rapid Muscle Activation after Rate of Force Development Training of the Elbow Flexors.” *Experimental Brain Research* 162:122–32.

Batuev, M. and L. Robinson. 2019. “Organizational Evolution and the Olympic Games: The Case of Sport Climbing.” *Sport in Society* 22(10):1674–90.

Bellumori, M., S. Jaric, and C. A. Knight. 2011. “The Rate of Force Development Scaling Factor (RFD-SF): Protocol, Reliability, and Muscle Comparisons.” *Experimental Brain Research* 212(3):359–69.

Best, C. H. and R. C. Partridge. 1928. “The Equation of Motion of a Runner, Exerting a Maximal Effort.” *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 103(724):218–25.

Billat, V., 2012 "Physiologie & méthodologie de l'entrainement ; de la théorie à la pratique. Belgique. Bruxelles. De Boeck Supérieur.

Billat, V., P. Palleja, T. Charlaix, P. Rizzardo, and N. Janel. 1995. “Energy Specificity of Rock Climbing and Aerobic Capacity in Competitive Sport Rock Climbers.” *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 35(1):20–24.

Bigland-Ritchie, B., E. F. Donovan and C. S. Roussos. 1981. "Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal efforts." *Journal of Applied Physiology* 51(5):1300-1305.

Blazevich, A. J., D. Cannavan, S. Horne, D. R. Coleman, and P. Aagaard. 2009. "Changes in Muscle Force-Length Properties Affect the Early Rise of Force in Vivo." *Muscle and Nerve* 39(4):512–20.

Bobbert, M. F. 2012. "Why Is the Force-Velocity Relationship in Leg Press Tasks Quasi-Linear Rather than Hyperbolic?" *Journal of Applied Physiology* 112(12):1975–83.

Bosco, C., P. Luhtanen, and P. V. Komi. 1983. "A Simple Method for Measurement of Mechanical Power in Jumping." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 50(2):273–82.

Bottinelli, R., M. Canepari, M. A. Pellegrino, and C. Reggiani. 1996. "Force-Velocity Properties of Human Skeletal Muscle Fibres: Myosin Heavy Chain Isoform and Temperature Dependence." *Journal of Physiology* 495(2):573–86.

Le Bozec, S. and S. Bouisset. 2004. "Does Postural Chain Mobility Influence Muscular Control in Sitting Ramp Pushes?" *Experimental Brain Research* 158(4):427–37.

Buchthal, F. and H. Schmalbruch. 1970. "Contraction Times and Fibre Types in Intact Human Muscle." *Acta Physiologica Scandinavica* 79(4):435–52.

Buckthorpe, M. W., R. Hannah, T. G. Pain, and J. P. Folland. 2012. "Reliability of Neuromuscular Measurements during Explosive Isometric Contractions, with Special Reference to Electromyography Normalization Techniques." *Muscle and Nerve* 46(4):566–76.

Carroll, T. J., S. Riek, and R. G. Carson. 2001. "Neural Adaptations to Resistance Training." *Sports Medicine* 31(12):829–40.

Casartelli, N., R. Lepers, and N. A. Maffiuletti. 2014. "Assessment of the Rate of Force Development Scaling Factor for the Hip Muscles." *Muscle & Nerve* 50(6):932–38.

Casartelli, N., R. Müller, and N. A. Maffiuletti. 2010. "Validity and Reliability of the Myotest Accelerometric System for the Assessment of Vertical Jump Height." *The Journal of Strength & Conditioning Research* 24(11):3186–93.

Chapman, A., B. Vicenzino, P. Blanch, and P. Hodges. 2009. “Do Differences in Muscle Recruitment between Novice and Elite Cyclists Reflect Different Movement Patterns or Less Skilled Muscle Recruitment?” *Journal of Science and Medicine in Sport* 12(1):31–34.

Cohen, C., D. Texier, G. Laffaye, L. Auvray, and C. Clanet. 2015. “Weightlifting and the Actomyosin Cycle.” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471(2184):20150473.

Cohen, J. 1988. “Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences Lawrence Earlbaum Associates.” *Hillsdale, NY* 20–26.

Cometti, G. and B. Joly. 1989. *Les Méthodes Modernes de Musculation*. edited by P. de l’Université de Bourgogne. Dijon.

Cormie, P., M. R. McGuigan, and R. .. Newton. 2011. “Developing Maximal Neuromuscular Power.” *Sports Medicine* 41(1):17–38.

Cronin, J. .. and K. T. Hansen. 2005. “Strength and Power Predictors of Sports Speed.” *Journal of Strength and Conditioning Research* 19(2):349–57.

Cronin, J. and G. Sleivert. 2005. “Challenges in Understanding the Influence of Maximal Power Training on Improving Athletic Performance.” *Sports Medicine* 35(3):213–34.

Cross, M. .., M. Brughelli, P. Samozino, S. Brown, and J. B. Morin. 2017. “Optimal Loading for Maximizing Power During Sled-Resisted Sprinting.” *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12:1069–77.

Van Cutsem, M. and J. Duchateau. 2005. “Preceding Muscle Activity Influences Motor Unit Discharge and Rate of Torque Development during Ballistic Contractions in Humans.” *Journal of Physiology* 562(2):635–44.

Van Cutsem, M., J. Duchateau, and K. Hainaut. 1998. “Changes in Single Motor Unit Behaviour Contribute to the Increase in Contraction Speed after Dynamic Training in Humans.” *Journal of Physiology* 513(1):295–305.

Datta, A. K., S. F. Farmer, and J. A. Stephens. 1991. “Central Nervous Pathways Underlying Synchronization of Human Motor Unit Firing Studied during Voluntary Contractions.” *Journal of Physiology* 432(1):401–25.

Del Vecchio, A., A. Casolo, F. Negro, M. Scorcelletti, I. Bazzucchi, R. Enoka, F. Felici and D. Farina. 2019a. "The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding". *The Journal Of Physiology*. 597(7) : 1873-1887.

Del Vecchio, A., F. Negro, A. Holobar, A. Casolo, J. P. Folland, F. Felici and D. Farina. 2019b. "You are as fast as your motor neurons : speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximale rate of force development in humans". *Journal Of Physiology*.597(9) : 2445-2456.

Dorel, S., A. Couturier, J.R. Lacour, H. Vandewalle, C. Hautier and F. Hug. 2010. "Force-Velocity Relationship in Cycling Revisited : Benefit of Two-Dimensional Pedal Forces Analysis". *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 42:1174-1183.

Dern, R.J., Leneve, J.M. and Blair, H.A. (1947). Forces exerted at different velocities in human arm movements. *American Journal of Physiology*. 151, 415-437.

Doutreloux, J. .., M. Masseglia, and P. Robert. 1992. *Le Muscle : De l'entretien à La Performance*. Amphora.

Draper, N., D. Giles, V. Schöffl, F. Konstantin Fuss, P. Watts, P. Wolf, J. Baláš, V. Espana-Romero, G. Blunt Gonzalez, S. Fryer, M. Fanchini, L. Vigouroux, L. Seifert, L. Donath, M. Spoerri, K. Bonetti, K. Phillips, U. Stöcker, F. Bourassa-Moreau, I. Garrido, S. Drum, S. Beekmeyer, J. L. Ziltener, N. Taylor, I. Beeretz, F. Mally, A. Mithat Amca, C. Linhart, and E. Abreu. 2015. "Comparative Grading Scales, Statistical Analyses, Climber Descriptors and Ability Grouping: International Rock Climbing Research Association Position Statement." *Sports Technology* 8(3–4):88–94.

Duchateau, J. and S. Baudry. 2011. *Neuromuscular Aspects of Sport Performance*. edited by P. V Komi.

Duchateau, J. and K. Hainaut. 1984. "Isometric or Dynamic Training: Differential Effects on Mechanical Properties of a Human Muscle." *Journal of Applied Physiology* 56(2):296–301.

Duchateau, J., J. G. Semmler, and R. M. Enoka. 2006. "Training Adaptations in the Behavior of Human Motor Units." *Journal of Applied Physiology* 101(6):1766–75.

Duchateau, Jacques and Karl Hainaut. 1988. “Training Effects of Sub-Maximal Electrostimulation in a Human Muscle.” *Medicine and Science in Sports and Exercise* 20(1):99–104.

Dugan, E. L., T. L. Doyle, B. Humphries, C. J. Hasson, and R. U. Newton. 2004. “Determining the Optimal Load for Jump Squats: A Review of Methods and Calculations.” *Journal of Strength and Conditioning Research* 18(3):668–74.

Enoka R. M. and D. G. Stuart. 1992. "Neurobiology of muscle fatigue." *Journal af applied Physiology* 72(5) : 1631-1648.

Enoka, R. M. and A. J. Fuglevand. 2001. “Motor Unit Physiology: Some Unresolved Issues.” *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine* 24(1):4–17.

Fanchini, M. F. Violette, F. M. Impellizzeri, and N. A. Maffiuletti. 2013. “Differences in Climbing-Specific Strength between Boulder and Lead Rock Climbers.” *The Journal of Strength and Conditioning Research* 27(2):310–14.

Folland, J. P., M. W. Buckthorpe, and R. Hannah. 2014. “Human Capacity for Explosive Force Production: Neural and Contractile Determinants.” *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 24(6):894–906.

Formenti, P., M. Umbrello, S. Coppola, S. Froio, and D. Chiumello. 2019. “Clinical Review: Peripheral Muscular Ultrasound in the ICU.” *Annals of Intensive Care* 9(1):1–13.

García-Ramos, A., S. Jaric, P. Padial, and B. Feriche. 2016. “Force Velocity Relationship of Upper Body Muscles : Traditional Versus Ballistic Bench Press.” *Journal of Applied Biomechanics* 32(2):178–85.

Giroux, C., G. Rabita, D. Chollet, and G. Guilhem. 2015. “What Is the Best Method for Assessing Lower Limb Force-Velocity Relationship ?” *International Journal of Sports Medicine* 36(02):143–49.

Glatthorn, J. F., S. Gouge, S. Nussbaumer, S. Stauffacher, F. M. Impellizzeri, and N. A. Maffiuletti. 2011. “Validity and Reliabiloty of Optojump Photoelectric Cells for Estimating Vertical Jump Height.” *Journal of Strength and Conditioning Research* 25(2):556–60.

Granacher, U., M. Gruber, and A. Gollhofer. 2009. “Resistance Training and Neuromuscular Performance in Seniors.” *International Journal of Sports Medicine* 30(9):652–57.

Grant, S., T. Hasler, C. Davies, T. C. Aitchison, J. Wilson, and A. Whittaker. 2001. “A Comparison of the Anthropometric, Strength, Endurance and Flexibility Characteristics of Female Elite and Recreational Climbers and Non-Climbers.” *Journal of Sports Sciences* 19(7):499–505.

Grant, S., V. Hynes, A. Whittaker, and T. Aitchison. 1996. “Anthropometric, Strength, Endurance and Flexibility Characteristics of Elite and Recreational Climbers.” *Journal of Sports Sciences* 14(4):301–9.

Guo, F., Q. Wang, Y. Liu, and N. Hanson. 2019. “Changes in Blood Lactate and Muscle Activation in Elite Rock Climbers during a 15-m Speed Climb.” *European Journal of Applied Physiology* 119(3):791–800.

Hakkinen, K., M. Kallinen, M. Izquierdo, K. Jokelainen, H. Lassila, E. Mälkiä, W. J. Kraemer, R. U. Newton, and M. Alen. 1998. “Changes in Agonist-Antagonist EMG, Muscle CSA, and Force during Strength Training in Middle-Aged and Older People.” *Journal of Applied Physiology* 84(4):1341–49.

Hakkinen, K., P. V. Komi, and M. Alén. 1985. “Effect of Explosive Type Stregth Training on Isometric Force and Relaxation Timen, Electromyographic and Muscle Fibre Characteristics of Leg Extensor Muscles.” *Acta Physiologica Scandinavica* 125:587–600.

Hannah, R. and J. P. Folland. 2015. “Muscle-Tendon Unit Stiffness Does Not Independently Affect Voluntary Explosive Force Production or Muscle Intrinsic Contractile Properties.” *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 40(1):87–95.

Harland, M. J. and J.R. Steele. 1997. "Biomechanics of the Sprint Start". *Sports Medicine* 23(1):11-20.

Henneman, E. 1957. “Relation between Size of Neurons and Their Susceptibility to Discharge.” *Science* 126(3287):1345–47.

Herzog, W. 2000. “Muscle Properties and Coordination during Voluntary Movement.” *Journal of Sports Sciences* 18(3):141–52.

Hill, A. V. 1938. “The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle.” *P RoY Lond B Bio* 126:136–95.

Hochholzer, T. and V. Schöffl. 2012. Escalade: Blessures et Traumatismes: Les Prévenir, Les Guérir. Glénat.

Huxley, A.F. (1957). Muscle structure and theories of contraction. *Progress in biophysics and biophysical chemistry* 7, 255-318.

Jaric, S. ,G. Markovic. 2009. "Leg Muscles Design : The Maximum Dynamic Output Hypothesis." *Medicine and Science in Sports Excercis* 41(4):780-787.

Jaric, S. 2015. "Force-Velocity Relationship of Muscles Performing Multi-Joint Maximum Performance Tasks." *International Journal of Sports Medicine* 36(09):699-704.

Jaskolski, A., B. Veenstra, P. Goossens, A. Jaskolska, and J. S. Skinner. 1996. "Optimal Resistance for Maximal Power during Treadmill Running." *Research in Sports Medicine: An International Journal* 7(1):17–30.

Jidovsteff, B., N. K. Harris, J. M. Crielaard, and J. B. Cronin. 2011. "Using the Load-Velocity Relationship for 1RM Prediction." *Journal of Strength and Conditioning Research* 5(1):267–70.

Jiménez-Reyes, P., P. Samozino, M. Brughelli, and J. B. Morin. 2017. "Effectiveness of an Individualized Training Based on Force-Velocity Profiling during Jumping." *Frontiers in Physiology* 7:677.

Jiménez-Reyes, P., P. Samozino, V. Cuadrado-Peñafiel, F. Conceição, J. J. González-Badillo, and J. B. Morin. 2014. "Effect of Countermovement on Power–Force–Velocity Profile." *European Journal of Applied Physiology* 114(11):2281–88.

Jiménez-Reyes, P., P. Samozino, V. Cuadrado-Peñafiel, F. Conceição, J. J. González-Badillo, and J. B. Morin. 2014. "A Simple Method to Measure Force-Velocity Profile in Counter Movement Jump." *British Journal of Sports Medicine* 48(Suppl 3):A3.2-A3.

Jiménez-Reyes, P., P. Samozino, F. Pareja-Blanco, F. Conceição, V. Cuadrado-Peñafiel, J. J. González-Badillo, and J. B. Morin. 2017. "Validity of a Simple Method for Measuring Force-Velocity-Power Profile in Countermovement Jump." *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12(1):36–43.

Johnson, S. T., K. Kipp, M. F. Norcross, and M. A. Hoffman. 2015. "Spinal and Supraspinal Motor Control Predictors of Rate of Torque Development." *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 25(5):623–29.

Korhonen, M. T., A. Cristea, M. Ale, K. Hakkinen, S. Sipila, A. Mero, J. T. Viitasalo, L. Larsson, and H. Suominen. 2006. "Aging , Muscle Fiber Type , and Contractile Function in Sprint-Trained Athletes." Journal of Applied Physiology 101(3):906–17.

Kozina, Z. L., O. A. Ryepko, K. .. Prusik, and Cieślicka M. 2013. “Physiological Possibility of Moutaineers and Climbers Specializing in Speed Climbing and Climbing Difficulty.” *Medical-Biological Problems of Physical Training in Sports* 41–46.

Kristiansen, M., P. Madeleine, E. A. Hansen, and A. Samani. 2015. “Inter-Subject Variability of Muscle Synergies during Bench Press in Power Lifters and Untrained Individuals.” *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 25(1):89–97.

Laffaye, G., J. M. Collin, G. Levernier, and J. Padulo. 2014. “Upper-Limb Power Test in Rock-Climbing.” *International Journal of Sports Medicine* 35(8):670–75.

Laffaye, G., G. Levernier, and J. M. Collin. 2016. “Determinant Factors in Climbing Ability: Influence of Strength, Anthropometry, and Neuromuscular Fatigue.” *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 26(10):1151–59.

Lara, A. J., J. Abian, L. M. Alegre, L. Jiménez, and X. Aguado. 2006. “Assessement of Power Output in Jump Tests for Applicants to a Sports Sciences Degree.” *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 46(3):419–24.

Leblanc, H., L. Seifert, L. Baudry, and D. Chollet. 2005. “Arm-Leg Coordination in Flat Breaststroke: A Comparative Study between Elite and Non-Elite Swimmers.” *International Journal of Sports Medicine* 26(9):787–97.

Lieber, R. L. and J. Fridén. 2000. “Functional and Clinical Significance.” *Muscle Nerve : Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine* 23(11):1647–66.

Linthorne, N. P. 2001. “Analysis of Standing Vertical Jumps Using a Force Platform.” *American Journal of Physics* 69(11):1198–1204.

López-Rivera, E. and J. J. González-Badillo. 2012. “The Effects of Two Maximum Grip Strength Training Methods Using the Same Effort Duration and Different Edge Depth on Grip Endurance in Elite Climbers.” *Sports Technology* 5(3–4):100–110.

Luhtanen, P. and P. Komi. 1979. “Mechanical Power and Segmental Contribution to Force Impulses in Long Jump Take-Off.” *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 41(4):267–74.

Macdonald, J. H. and N. Callender. 2011. “Athletic Profile of Highly Accomplished Boulderers.” *Wilderness and Environmental Medicine* 22(2):140–43.

Macfarlane, D. J., N. T. Chan, M. A. Tse, and G. M. Joe. 2016. “Agreement between Bioelectrical Impedance and Dual Energy X-Ray Absorptiometry in Assessing Fat, Lean and Bone Mass Changes in Adults after a Lifestyle Intervention.” *Journal of Sports Sciences* 34(12):1176–81.

Macleod, D., D. L. Sutherland, L. Buntin, A. Whitaker, T. Aitchison, I. Watt, J. Bradley, and S. Grant. 2007. “Physiological Determinants of Climbing-Specific Finger Endurance and Sport Rock Climbing Performance.” *Journal of Sports Sciences* 25(12):1433–43.

Maffiuletti, N. A., P. Aagaard, A. J. Blazevich, J. Folland, N. Tillin, and J. Duchateau. 2016. “Rate of Force Development: Physiological and Methodological Considerations.” *European Journal of Applied Physiology* 116(6):1091–1116.

Magiera, A., R. Roczniok, A. Maszczyk, M. Czuba, J. Kantyka, and P. Kurek. 2013. “The Structure of Performance of a Sport Rock Climber.” *Journal of Human Kinetics* 36(1):107–17.

Margaria, R., P. Aghemo, and E. Rovelli. 1966. “Measurement of Muscular Power (Anaerobic) in Man.” Journal of Applied Physiology 21(5):1662–64.

Markovic, G., S. Jaric. 2007. "Positive and Negative Loading and Mechanical Output in Maximum Vertical Jumping". *" Medicine & Science in Sports & Exercise* 39(10):1757-1764.

Marques, M. C., R. Van den Tilaar, J. D. Vescovi, and J. J. Gonzalez-Badillo. 2007. “Relationship between Throwing Velocity, Muscle Power, and Bar Velocity during Bench Press in Elite Handball Players.” *International Journal of Sports Physiology and Performance* 2(4):414–22.

Medernach, P. J., H. Kleinöder, and H. H. Lötzerich. 2015. “Fingerboard in Competitive Bouldering : Training Effects on Grip Strength and Endurance.” *The Journal of Strength and Conditioning Research* 29(8):2286–95.

Michailov, M. L., J. Baláš, S. K. Tanev, H. S. Andonov, J. Kodejška, and L. Brown. 2018. “Reliability and Validity of Finger Strength and Endurance Measurements in Rock Climbing.” *Research Quarterly for Exercise and Sport* 89(2):246–54.

Michailov, M., L. V. Mladenov, and V. R. Schöffl. 2009. “Anthropometric and Strength Characteristics of World-Class Boulderers.” *Medicina Sportiva* 13(4):231–38.

Morin, J. B. and P. Samozino. 2016. “Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training.” *International Journal of Sports Physiology and Performance* 11(2):267–72.

Morin, J. B., P. Samozino, R. Bonnefoy, P. Edouard, and A. Belli. 2010. “Direct Measurement of Power during One Single Sprint on Treadmill.” *Journal of Biomechanics* 43(10):1970–75.

Morin, J. B., P. Jiménez-Reyes, M. Brughelli and P. Samozino. 2019. "When Jump Height is Not az Good Indicator of Lower Limb Maximal Power Output : Theorical Demonstration, Experimental Evidence and Practical Solutions". *Sports Medicine* 49(4):999-1006.

Muñoz-López, M., D. Marchante, M. A. Cano-Ruiz, J. L. Chicharro, and C. Balsalobre-Fernández. 2017. “Load, Force and Power-Velocity Relationships in the Prone Pull-up Exercise.” *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12(9):1249–55.

Newton, I. 1687. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Pepys., S.

Noe, F., F. Quaine, and L. Martin. 2001. “Influence of Steep Gradient Supporting Walls in Rock Climbing : Biomechanical Analysis.” *Gait and Posture* 13(2):86–94.

Ozimek, M., M. Krawczyk, E. Zadarko, Z. Barabasz, T. Ambrozy, A. Stanula, D. Mucha, A. Jurczak, and D. Mucha. 2017. “Somatic Profile of the Elite Boulderers in Poland.” *Journal of Strength and Conditioning Research* 31(4):963–70.

Ozimek, M., R. Rokowski, P. Draga, V. Ljakh, T. Ambroży, M. Krawczyk, T. Ręgwelski, A. Stanula, K. Görner, A. Jurczak, and D. Mucha. 2017. “The Role of Physique, Strength and Endurance in the Achievements of Elite Climbers.” *PLos One* 12(8):1–11.

Quaine, F., L. Vigouroux, F. Paclet, and F. Colloud. 2011. “The Thumb during the Crimp Grip.” *International Journal of Sports Medicine* 32(1):49–53.

Rabita, G., S. Dorel, J. Slawinski, E. Sàez-de-Villarreal, A. Couturier, P. Samozino, and J.B. Morin. 2015. "Sprint Mechanics in World-Class Athletes : A New Insight into the Limits of Human Locomotion". *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports.* 25(5):583-94.

Rahmani, A.(2000). Mesure de la force musculaire à partir de l'accélération appliquée à une charge. Relation force-vitesse dans des conditions ballistiques. Thèse de doctorat. Lyon: Université Claude Bernard.

Rahmani, A., G. Dalleau, F. Viale, C. A. Hautier, and J. Lacour. 2000. "Validity and Reliability of a Kinematic Device for Measuring the Force Developed during Squatting." *Journal of Applied Biomechanics* 16:26–35.

Rahmani, A., P. Samozino, J. B. Morin, and B. Morel. 2017. "A Simple Method for Assessing Upper-Limb Force–Velocity Profile in Bench Press." *International Journal of Sports Physiology and Performance* 13(2):200–207.

Reeves, N. D., C. .. Maganaris, S. Longo, and M. V. Narici. 2009. "Differential Adaptations to Eccentric versus Conventional Resistance Training in Older Humans." *Experimental Physiology* 94(7):825–33.

Rivière, J. R., J. Rossi, P. Jiménez-Reyes, J. B. Morin, and Pierre Samozino. 2017. "Where Does the One-Repetition Maximum Exist on the Force-Velocity Relationship in Squat?" *International Journal of Sports Medicine* 38(13):1035–43.

De Ruiter, C. J., R. D. Kooistra, M. I. Paalman, and A. De Haan. 2004. "Initial Phase of Maximal Voluntary and Electrically Stimulated Knee Extension Torque Development at Different Knee Angles." *Journal of Applied Physiology* 97(5):1693–1701.

De Ruiter, C. J., D. Van Leeuwen, A. Heijblom, M. Bobbert, and A. De Haan. 2006. "Fast Unilateral Isometric Knee Extension Torque Development and Bilateral Jump Height." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38(10):1843–52.

Ryepko, O. A. 2013a. "Features and Functionality of Speed and Power Capabilities of Elite Climbers and Various Types of Rock Climbing." *Physical Education of Students* 17(6):60–65.

Ryepko, O. A. 2013b. "Morphological Characteristics of Elite Athletes, Specializing in Speed Climbing, Climbing and Alpinism." *Pedagogics, Psychology, Medical-Biological Problems of Physical Training and Sports* 17(12):67–71.

Saeterbakken, A. H., E. Loken, S. Scott, E. Hermans, A. V. Vereide, and V. Andersen. 2018. "Effects of Ten Weeks Dynamic or Isometric Core Training on Climbing Performance among Highly Trained Climbers." *PLoS One* 13(10):1–13.

Sahaly, R., H. Vandewalle, T. Driss, and H. Monod. 2001. "Maximal Voluntary Force and Rate of Force Development in Humans - Importance of Instruction." *European Journal of Applied Physiology* 85(3–4):345–50.

Samozino, P., P. Edouard, S. Sangnier, M. Brughelli, P. Gimenez, and J. B. Morin. 2014. “Force-Velocity Profile: Imbalance Determination and Effect on Lower Limb Ballistic Performance.” *International Journal of Sports Medicine* 35(6):505–10.

Samozino, P., J. B. Morin, F. Hintzy, and A. Belli. 2008. “A Simple Method for Measuring Force, Velocity and Power Output during Squat Jump.” *Journal of Biomechanics* 41(14):2940–45.

Samozino, Pierre, E. Rejc, P. E. Di Prampero, A. Belli, and J. B. Morin. 2012. “Optimal Force-Velocity Profile in Ballistic Movements-Altius: Citius or Fortius?” *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44(2):313–22.

Sargeant, A. J., Hoinville, E. and Young, A. (1981). Maximum leg force and power output during short-term dynamic exercise. J. Appl. Physiol. 51, 1175-1182

Schiaffino, S. and C. Reggiani. 2011. “Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles.” *Physiological Reviews* 91(4):1447–1531.

Schöffl, I., F. Einwag, W. Strecker, F. Hennig, and V. Schöffl. 2007. “Impact of Taping after Finger Flexor Tendon Pulley Ruptures in Rock Climbers.” *Journal of Applied Biomechanics* 23(1):52–62.

Schweizer, A. 2001. “Biomechanical Properties of the Crimp Grip Position in Rock Climbers.” *Journal of Biomechanics* 34(2):217–23.

Sears, T. A. and D. Stagg. 1976. “Short-Term Synchronization of Intercostal Motoneurone Activity.” *Journal of Physiology* 263(3):357–81.

Sreckovic, S., I. Cuk, S. Djuric, A. Nedeljkovic, D. Mirkov, and S. Jaric. 2015. “Evaluation of Force–Velocity and Power–Velocity Relationship of Arm Muscles.” *European Journal of Applied Physiology* 115(8):1779–87.

Staron, R. S. 1997. “Human Skeletal Muscle Fiber Types : Delineation, Development, and Distributin.” *Canadian Journal of Applied Physiology* 22(4):307–27.

Stien, N., A. H Saeterbakken, E. Hermans, V. A. Vereide, E. Olsen and V. Andersen. 2019. "Comparison of climbing-specific strength and endurance between lead and boulder climbers." *Plos One* 14(9).

Teramoto, M., C. L. Cross, R. H. Rieger, T. G. Maak, and S. E. Willick. 2018. Predictive Validity of National Basketball Association Draft Combine on Future Performance. *The Journal of Strength and Conditioning Research* 32(2) : 396-408.

Thomas, G. A.,W. J. Kraemer, B. A. Spiering, J. S. Volek, J.M. Anderson and C. M. Marseh. 2007 "Maximal Power at Different Percentages of One Repetition Maximum : Influence of Resistance and Gender". *Journal of Strength and Conditioning and Research* 21(2):336-342.

Thompson, B. J., E. D. Ryan, T. J. Herda, P. B. Costa, A. A. Walter, E. J. Sobolewski, and J.T. Cramer. 2012. "Consistency of Rapid Muscle Force Characteristics: Influence of Muscle Contraction Onset Detection Methodology." *Journal of Electromyography and Kinesiology* 22(6):893–900.

Tidow, G. and K. Wiemann. 1993. "Zur Interpretation Und Veränderbarkeit von Kraft-Zeit-Kurven Bei Explosiv-Ballistischen Krafteinsätzen." *Deutsche Zeitschrift Für Sportmedizin - Sonderdruck* 44(3):92–103.

Tillin, N. A., P. Jimenez-Reyes, M. T. G. Pain, and J. P. Folland. 2010. "Neuromuscular Performance of Explosive Power Athletes versus Untrained Individuals." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42(4):781–90.

Tillin, N.A., M. T. G. Pain, and J. P. Folland. 2011. "Short-term Unilateral Resistance Training Affects the Agonist–Antagonist but Not the Force–Agonist Activation Relationship." *Muscle & Nerve* 43(3):375–84.

Tillin, N. A., M. T. G. Pain, and J. P. Folland. 2013a. "Explosive Force Production during Isometric Squats Correlates with Athletic Performance in Rugby Union Players." *Journal of Sports Sciences* 31(1):66–76.

Tillin, N. A., M. T. G. Pain, and J. P. Folland. 2013b. "Identification of Contraction Onset during Explosive Contractions. Response to Thompson et Al. "Consistency of Rapid Muscle Force Characteristics: Influence of Muscle Contraction Onset Detection Methodology." *Journal of Electromyography and Kinesiology* 23(4):991–94.

Vandewalle, H., G. Peres, J. Heller, J. Panel, and H. Monod. 1987. "Force-Velocity Relationship and Maximal Power on a Cycle Ergometer - Correlation with the Height of a Vertical Jump." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 56(6):650–56.

Vandewalle, H., G. Peres, and H. Monod. 1987. “Standard Anaerobic Tests.” *Sports Medicine* 4:268–89.

Vigouroux, L., M. Devise, T. Cartier, C. Aubert, and E. Berton. 2018. “Performing Pull-Ups with Small Climbing Holds Influences Grip and Biomechanical Arm Action.” *Journal of Sports Sciences* 37(8):886–894.

Vigouroux, L. and F. Quaine. 2006. “Fingertip Force and Electromyography of Finger Flexor Muscles during a Prolonged Intermittent Exercise in Elite Climbers and Sedentary Individuals.” *Journal of Sports Sciences* 24(2):181–86.

Watts, P. B. 2004. “Physiology of Difficult Rock Climbing.” *European Journal of Applied Physiology* 91(4):361–72.

Watts, P. B., M. Daggett, P. Gallagher, and B. Wilkins. 2000. “Metabolic Response during Sport Rock Climbing and the Effects of Active versus Passive Recovery.” *International Journal of Sports Medicine* 21(3):185–90.

Watts, P. B., L. M. Joubert, A K. Lish, J. D. Mast, and B. Wilkins. 2003. “Anthropometry of Young Competitive Sport Rock Climbers.” *British Journal of Sports Medicine* 37(5):420–24.

Watts, P. B., D. T. Martin, and S. Durtschi. 1993. “Anthropometric Profiles of Elite Male and Female Competitive Sport Rock Climbers.” *Journal of Sports Sciences* 11(2):113–17.

Weineck, J. 1997. *Manuel d’entrainement*. Vigot. Paris.

White, D. J. and P. D. Olsen. 2010. “A Time Motion Analysis of Bouldering Style Competitive Rock Climbing.” *The Journal of Strength and Conditioning Research* 24(5):1356–60.

Williams, L. R. T. and A. Walmsley. 2000. “Response Timing and Muscular Coordination in Fencing : A Comparison of Elite and Novice Fencers.” *Journal of Science and Medicine in Sport* 3(4):460–75.

Wisløff, U., C. Castagna, J. Helgerud, R. Jones, and J. Hoff. 2004. “Strong Correlation of Maximal Squat Strength with Sprint Performance and Vertical Jump Height in Elite Soccer Players.” *British Journal of Sports Medicine* 38(3):285–88.

ANNEXE 1 : COTATIONS EN ESCALADE

Climbing Group		Vermin	Font	IRCRA Reporting Scale	YDS	French/sport	British Tech	Ewbank	BRZ	UIAA	Metric UIAA	Watts
Lower Grade (Level 1) Male & Female				1	5.1	1	2	4	I sup	I	1.00	
				2	5.2	2		6	II	II	2.00	
				3	5.3	2+	3	8	II sup	III	3.00	
				4	5.4	3-			III	III+	3.50	
				5	5.5	3	4	10	IV	IV	4.00	
				6	5.6	3+		12		IV+	4.33	0.00
				7	5.7	4		14	V	V-	4.66	0.25
				8	5.8	4+	5a			V	5.00	0.50
		VB	< 2	9	5.9	5		16	V sup	V+	5.33	0.75
				10	5.10a	5+		18		VI-	5.66	1.00
	Intermediate (Level 2) Female	V0-	3	11	5.10b	6a	5b	19	VI	VI	6.00	1.25
Intermediate (Level 2) Male		V0	4	12	5.10c	6a+				VI+	6.33	1.50
		V0+	4+	13	5.10d	6b	5c	20	VI sup	VII-	6.66	1.75
		V1	5	14	5.11a	6b+		21	7a	VII	7.00	2.00
		V2	5+ 6A	15	5.11b	6c	6a	22	7b	VII+	7.33	2.25
				16	5.11c	6c+				VIII-	7.66	2.50
	Advanced (Level 3) Female	V3	6A+ 6B	17	5.11d	7a		23	7c	VIII	8.00	2.75
		V4	6B+	18	5.12a	7a+	6b	24	8a	VIII+	8.33	3.00
		V5	6C 6C+	19	5.12b	7b		25	8b	IX-	8.66	3.25
Advanced (Level 3) Male		V6	7A	20	5.12c	7b+		26	8c			3.50
		V7	7A+	21	5.12d	7c	6c	27	9a	IX	9.00	3.75
		V8	7B	22	5.13a	7c+		28	9b	IX+	9.33	4.00
	Elite (Level 4) Female	V9	7B+ 7C	23	5.13b	8a		29	9c	X-	9.66	4.25
				24	5.13c	8a+		30	10a	X	10.00	4.50
Elite (Level 4) Male		V10	7C+	25	5.13d	8b	7a	31	10b			4.75
		V11	8A	26	5.14a	8b+		32	10c	X+	10.33	5.00
		V12	8A+	27	5.14b	8c	7b	33	11a	XI-	10.66	5.25
		V13	8B	28	5.14c	8c+		34	11b	XI	11.00	5.50
Higher Elite (Level 5) Male	Higher Elite (Level 5) Female	V14	8B+	29	5.14d	9a		35	11c	XI+	11.33	5.75
				30	5.15a	9a+		36	12a			6.00
		V15	8C	31	5.15b	9b		37	12b	XII-	11.66	6.25
		V16	8C+	32	5.15c	9b+		38	12c	XII	12.00	6.50

Note : IRCRA stands for the International Rock Climbing Association; YDS for Yosemite Decimal System; BRZ for Brazilian scale, UIAA for the Union Internationale des Associations d'Alpinisme and Font for Fontainebleau. Sources: Watts, Martin & Durtschi (1993), Benge & Raleigh (1995), Draper et al. (2011b), Schöffl et al. (2010), BMC (2007), Rockfax (n.d.), The American Alpine Club (2012).

ANNEXE 2 : 1ER ARTICLE PUBLIE, 2017

Levernier, G. and G. Laffaye. 2017
Four Weeks of Finger Grip Training Increases the Rate of Force Development and the Maximal Force in Elite and Top World-Ranking Climbers.
"*Journal of Strength and Conditioning Research*" 33 (9) : 2471-2480.

Four Weeks of Finger Grip Training Increases the Rate of Force Development and the Maximal Force in Elite and Top World-Ranking Climbers

Guillaume Levernier[1,2] and Guillaume Laffaye[1,2]

[1]CIAMS, University Paris-Sud, University Paris-Saclay, Orsay, France; and [2]CIAMS, University d'Orléans, Orléans, France

Abstract

Levernier, G and Laffaye, G. Four weeks of finger grip training increases the rate of force development and the maximal force in elite and top world-ranking climbers. *J Strength Cond Res* 33(9): 2471–2480, 2019–The goal of this study was to assess the impact of a specific 4-week training program on finger grip in climbers; specifically, on the maximal force and the rate of force development (RFD) of finger muscles in isometric contraction. The participants were 14 French male rock climbers who took part in national and international bouldering competitions (at world-ranking and elite levels). They were divided into 2 samples. The experimental group performed a specific 4-week training program that included such exercises as suspensions on small holds at the rate of 2 times a week. The control group performed climbing exercises only. The maximal force and the RFD were recorded using a specific dynamometer in 3 different holding conditions (slope crimp, half crimp, and full crimp). Results reveal a significant gain of force for the slope crimp (+8%) and a high increase of the RFD in the first 200 ms of the force-time slope (between 27.5 and 32% for averaged conditions), suggesting a neural gain rather than a change in muscle-tendon structure. These results reveal that a 4-week training program is enough to improve the level of maximum force and the RFD in elite climbers. Bearing in mind that climbing will make its appearance in a future Olympic Games in the form of a combined competition, i.e., bouldering, speed climbing, and lead climbing, it will be crucial for each athlete to develop both a high level of force and RFD to be competitive.

Key Words field testing, training and testing, bouldering, flexor digitorum profundus, flexor digitorum superficialis

Address correspondence to Guillaume Laffaye, guillaume.laffaye@u-psud.fr.

33(9)/2471–2480

Journal of Strength and Conditioning Research
© 2019 National Strength and Conditioning Association

Introduction

Climbing is a performance sport that includes sub-disciplines, such as lead climbing, bouldering, and speed climbing. Bouldering is performed without the use of ropes or harnesses and is characterized by a succession of short complex movements on a climbing structure not exceeding 5 m in height. The movements necessitate a high level of coordination and physical ability. Climbing was recently approved to be included in the 2020 Olympic Games in Tokyo. The results of the 3 aforementioned sub-disciplines will be combined. In such a context, the motivation for improving performance factors is clear, especially for bouldering, which is one of the 3 events in the future Olympic Games. In recent decades, several studies have demonstrated that climbing performance is a combination of psychological factors (26), neuromuscular factors (15,28,37), tactical and technique factors (25), and anthropometric variables (23,28).

When focusing on bouldering, literature shows the importance of finger grip strength for elite boulderers. Averaged values range from 278 ± 18 to 459 ± 23 N according to various studies that have dealt with this topic (20,23,27) revealing the major role of flexor digitorum profondus (FDP) and flexor digitorum superficialis (FDS) in bouldering. Indeed, a recent study (20) revealed that elite climbers have a 20% higher value of finger grip strength than skilled ones and one that is 62% higher than for novices. Indeed, although there is a difference in strength in the flexor muscles of climbers' and nonclimbers' fingers (20,23), the force of the hand flexor muscles during an isometric effort between elites and novices (450 ± 122 N for the novices vs. 567 ± 121 N for the elite) does not diverge. The typical time for a bouldering attempt is about 30 seconds with an effective static phase of 7.5 seconds and a dynamic phase of 22.5 seconds (39). The dynamic phase is made up of explosive movements that require the grip to hold as strong and as fast as possible.

Moreover, the maximal force depends both on the level of expertise (16,38) and on the kind of hold used (i.e., slope, half crimp, or full crimp) (2). Climbers are able to deliver a higher

level of force with a full crimp compared with a half crimp (439.6 ± 55.5 vs. 360.8 ± 34.6 N), whereas no difference has been found between the slope crimp and the half crimp (350.8 ± 56.0 N) (2).

Furthermore, the way the force is produced seems crucial. The change in force over time, namely the rate of force development (RFD in $N \cdot s^{-1}$), is highly dependent on the slope of the force until the maximal value or a percentage of this value. This variable is highly critical in several sports, such as sprinting or jumping (22), but has rarely been investigated in climbing. Indeed, several sports feature athletic movements that are shorter than the time necessary to achieve the maximum force (5). Typically, for lower limbs, the peak force occurs within around 250 ms (18), whereas athletic movements are of a lower duration; for example, in sprinting ≈100 ms (7), long jumping ≈160 ms (22), or high jumping ≈200 ms (11). Up to now, little is known on the way the force is produced during bouldering, except on the maximal and mean force (12). Only 1 study (14) reveals the crucial role of RFD to discriminate boulderers from lead climbers of comparable level of expertise during an isometric test of flexor finger, with a +36.7% higher value observed in boulderers. The authors conclude that "the RFD may reflect the specific requirements of bouldering and seem to be more appropriate than pure maximal strength for investigating muscle function in rock climbers." This higher value of RFD could be explained by the several situations requiring a high level of force to be used in a short time, such as the "dyno," which consists in jumping with arms in an aerial phase, during which time the climber is no longer in contact with the wall. If complementary studies should be done for a better understanding of the different movements in bouldering and their specific constraints of force and time, it seems obvious, based on the literature, that increasing the level of finger flexor strength and the RFD with training seems crucial for improvements in performance.

To the best of our knowledge, only 1 study has investigated the gain obtained with training. Medernach et al. (27) divided a sample of skilled climbers into 2 groups. The first group followed a specific training program, whereas the second one climbed freely without any special instruction. The training cycle lasted 4 weeks with 3 workouts per week. The sessions were performed on a fingerboard and the exercises lasted between 5 and 10 seconds. They solicited isometric and concentric muscular actions by grasping the grip in different positions. Results show that the "trained" group was able to hold the different grips for longer (12.5 ± 2.5 seconds vs. 8.6 ± 2.0 seconds for the full crimp and 11.4 ± 2.7 seconds vs. 9.2 ± 2.4 seconds for the slope crimp). If this study gives interesting information on the impact of a fingerboard training on the ability of holding a crimp as long as possible, little is known about the impact on maximal finger force. Nevertheless, to date, no study has dealt with the impact of training on the flexor muscles of the fingers for a sample of elite climbers in terms of the strength and RFD.

Based on this theoretical background, we hypothesize that a specific 4-week training program focusing on finger grip in world top-ranking climbers increases the maximal force and the RFD.

Methods

Experimental Approach of the Problem

The experiment took place between November 2016 and January 2017, so as not to clash with any competitive event. The subjects were elite and top world-ranking climbers, with a mean training frequency of 6 times a week. Recruitment was supported by the French national team's coaches and was based on the criteria of a minimal skill level and participation in national or international competitions. The goal of the study was to test the impact of a 4-week training program on finger grip force and the RFD. For this purpose, the 14 climbers participating were randomly divided into either the control group (7 climbers) or the experimental group (7 climbers). One week before the training cycle began, they visited the laboratory on 2 occasions to have force and anthropometric measurements taken. They returned 1 week after the cycle. The training program was designed in conjunction with the French national team's coaches and was repeated 2 times a week for 4 weeks. The other 4 training sessions involved regular exercises. Finally, the protocol did not change the frequency of training for both groups (6 regular climbing training sessions for the control group vs. 4 regular and 2 designed training sessions for the experimental group).

Subjects

Fourteen French male rock climbers who take part in national and international bouldering world-ranking competitions participated in this study. The criteria to be included in the sample were as follows: a level higher than 8b Fb and YDS: 5.13d (Fb corresponds to Fontainebleau, a rating scale used in bouldering and YDS for Yosemite decimal system), minimum training experience of 5 years and no injury to the hands or the upper limb for the past year. All the climbers were ranked among the 20 top climbers in France for the 2015–2016 season; of these, 6 of them were in the top 20 world-ranking climbers. They were fully informed about the protocol before participating in this study and they signed an informed consent form. All subjects were over 18 years (between 19 years and 30 years). This research protocol was conducted according to the principles of the Declaration of Helsinki on human research, and the protocol was approved by the ethical board of the University Paris-Sud.

Procedures

Each climber observed a 2-day resting period before each test to avoid the effect of fatigue caused by earlier climbing sessions. The test took place in the Karma Room at the French climbing center (Route Militaire, 77,300 Fontainebleau). Athletes received the same 10-minute warm-up followed by a period of 30 minutes of exercise during which they climbed on the same structure, starting at low intensity



Figure 1. Slope, half crimp, and full crimp grip. The slope crimp is characterized by a flexion of the distal interphalangeal (IPD) and a little flexion of the proximal interphalangeal (IPP). For the half crimp, the angle of the IPP is 90° with an extension for the IPD. For the full crimp, the thumb closes the other fingers with a hyperextension for the IPD and an angle for 90° for the IPP.

and ending with high-intensity movements. They performed the test at the same time of the day (10 AM) and in the same place to eliminate any influence of circadian variation or changes in ambient conditions (20 ± 0.5° C). Finally, they had 10 minutes to familiarize themselves with the material of the experiment (i.e., the dynamometer on the climbing wall). Subjects stood with 1 hand on the dynamometer. The angle between the arm and the chest was 20° in the sagittal plane and the angle between the arm and the forearm was set to 90°. During the test, the subjects were advised not to move. The other arm stayed still along the body. Three different holds were selected (i.e., the slope crimp, half crimp, and full crimp, Figure 1). These brought into play the flexor digitorum profundus (FDP) muscle and the flexor digitorum superficialis (FDS) muscle as the main muscles (2).

Climbers in the first group climbed regularly but did not follow a specific training program during the experiment. Subjects in the experimental group performed a specific training program 2 times a week for 4 weeks, which involved exercises with suspensions on small holds. The exercises were designed in conjunction with the French team's coach and consisted of a series of isometric-type exercises (Table 1 for details). The climbers were in a standing position, hanging from a personalized small hold (slats ranging from 25 mm to 6 mm off the mark 180°) (rue des dolmens, 46,220 Prayssac) and high rise technology (Mladost 4, 1715 Sofia, Bulgaria) with 1 hand. They had to hold on as long as possible without making contact between the foot and the ground, before falling with a 120° angle between the arm and the forearm (Figure 2). The other hand did not touch down.

The size and the grip of the hold were chosen individually in such a way that athletes could not stay in 1 hold for more than 6 seconds. To limit the risk of injury, climbers warmed up their upper limbs with suspensions that used a large

TABLE 1. Training plan for the experimental group.*

No. of series: 2	
No. of exercises/series: 6	
Time of recovery between each exercise: 3 min	
Slope crimp	Time of effort: 4–6 s
Half crimp	Time of effort: 4–6 s
Half crimp	Time of effort: 4–6 s
Slope crimp	Time of effort: 4–6 s
Half crimp	Time of effort: 4–6 s
Half crimp	Time of effort: 4–6 s

*This training is performed 2 times a week during 4 weeks.

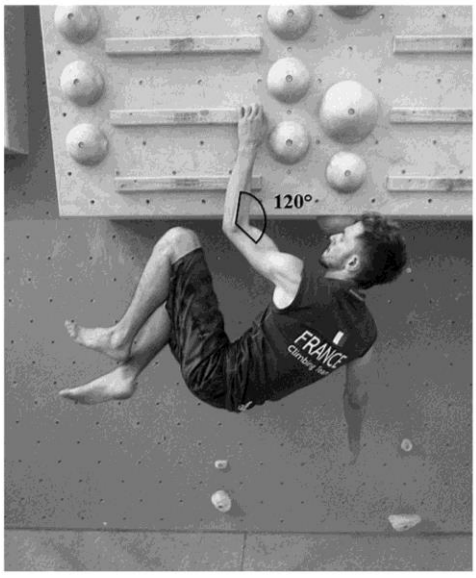


Figure 2. Training exercise for half crimp in no foot. The crimp is individually chosen to be held between 4 and 6 s with an elbow angle about 120°.

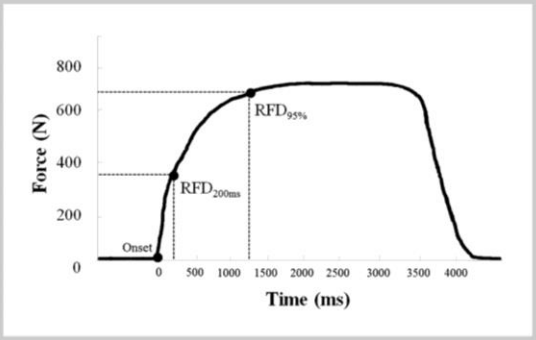


Figure 3. Typical force-time curve during an isometric contraction of finger during a slope crimp. The rate of force development (RFD) is defined as the mean value of the slope between the onset and 200 ms of the maximal force ($RFD_{200\ ms}$) and between onset and 95% of the peak of force ($RFD_{95\%}$).

degree of prehension (easier than those used in training). In addition, if pain occurred during the exercise, they immediately had to stop. This exercise was repeated for both hands in both conditions (slope and half crimps), with the training plane detailed in Table 1. The training session lasted about 45 minutes.

Anthropometric Variables. The following variables were measured: height (in meters); percentage of fat (%); "Arm span," defined as the size of the arm; and the "ape index," defined as the ratio between the arm span and the height. Anthropometrical data were recorded using an anthropometer with 0.1 cm accuracy and with an impendency balance, "InnerScan," Tanita BC 545n (TANITA, Amsterdam, the Netherlands). This allowed us to measure variables such as body mass (BM), and body fat (BF %), with 0.1% accuracy.

Force and Rate of Force Development. Maximal force and RFD were assessed using a dynamometer "power grip manipulandum," PGM (SENSIX, biopôle, 4 rue Carol Heitz- 86,000 Poitiers), with dimensions of 120 × 45 × 25 mm, mass of 320 g, and sensitivity of 0.166%, calibrated at a frequency of 100 Hz. This dynamometer is powered by 5v and is connected to the computer with an acquisition card. The data can be processed by specific software and are stored in the computer for further analysis.

With regard to the type of grip, the slope crimp is characterized by a flexion of the distal interphalangeal (IPD) and a small flexion of the proximal interphalangeal (IPP). For the half crimp, the angle of the IPP is 90° and 0° for the IPD, with an extension for the IPD. Finally, for the full crimp, the thumb closes the other fingers with a hyperextension of the IPD and an angle of 90° for the IPP.

The instructions were to "hold the device as strongly as you can and as fast as possible" to optimize both variables (24): maximal force and RFD. Data were recorded using PGM software and then exported to Excel 2010 for further calculation of the biomechanical variables, i.e., maximal force and RFD. We used the systematic method detailed in a study by Tillin et al. (34) to determine the contraction onset of the unfiltered force-time curve recorded manually; in other words, the instant at which the force increased at a threshold of 4 N to obtain a robust onset of force. This method has been shown to be reliable and time efficient (3). Considering the importance of being able to accurately detect the onset and high variation of RFD, the force signal was not filtered or smoothed to maintain baseline noise and to prevent time shifts, as proposed by Maffiuletti et al. (24). The RFD was then measured in 2 ways, in line with the definition put forward by Aagaard et al. (1). First, we measured the explosive muscle strength as "the rise in the contractile force at the onset of contraction, i.e., the RFD exerted within the early phase of rising muscle force, within the initial 100–200 ms of contraction." The RFD was also measured from the onset to 200 ms ($RFD_{200\ ms}$) to assess what is called the "explosive muscle strength." Last, we calculated the absolute RFD, i.e., the time between the onset and the value of force obtained during the plateau of force, corresponding to the total contractile impulse than can be produced until the maximal force is achieved (24). Considering that the typical curve during the isometric contraction shows a maximal value of force that plateau over a long period, at either the beginning, middle, or end of the plateau, we chose a value of 95% of

Table 2. Anthropometric characteristics of the experimental (training) and control groups.*†

	Age (y)	Height (cm)	BMI ($kg \cdot m^{-2}$)	Arm spam	Ape index	Mass (before training) (Kg)	Mass (after training) (Kg)	% of body fat (before training)	% of body fat (after training)
Control	26.1 ± 1.2	173 ± 5	21.7 ± 1.9	178.1 ± 8	1.02 ± 0.1	64.5 ± 3.3	64.0 ± 3.5	9.2 ± 1.4	9.3 ± 1.4
Training	26.1 ± 3	175.9 ± 6	20.9 ± 2.1	180.6 ± 9	1.02 ± 0.1	63.9 ± 3.6	64.2 ± 3.2	8.7 ± 3	9.0 ± 2.5

*BMI = body mass index; ape index, ratio of arm span to height.
†No statistical difference was found for any variable and between before and after training.

maximal force to calculate the total rate of force between the onset and the final slope and not during the plateau when force is maintained. This parameter was also called $RFD_{95\%}$ (Figure 3).

Statistical Analyses

Descriptive statistics were used to verify that the basic assumption of normality for all the studied variables was correct. Statistical tests were processed using STATISTICA software (version 10, StatSoft, Inc.). For each grip condition (slope crimp, half crimp, and full crimp), 3 trials were performed in a random order to avoid order effect.

To check the reliability of our method, the intraclass correlation (ICC) and the coefficient of variation (CV) were calculated. For the 3 conditions, the ICC ranged between 0.833 and 0.979 and the CV between 4 and 6%. According to Atkinson and Nevill (4), an ICC >0.8 and a CV <10% are guarantees of excellent reliability. The maximal force F_{max} was studied in terms of absolute and normalized values by dividing it by the weight of the climber. Indeed, the strongest climber would be the one who would be able to develop the most force with the smallest mass possible (23).

An analysis of variance (ANOVA) was performed with repeated measurements of the time (before and after training), with the group as an inter-subject factor and training as an intra-subject factor to compare the differences of gain between the 2 groups. When the ANOVA was significant, a Fischer's post hoc test and power (1-β) were performed. For all statistical analyses, significance was set at $p \leq 0.05$ and effect size (η^2) was defined as small for $\eta^2 > 0.01$; medium $\eta^2 > 0.09$; and large for $\eta^2 > 0.25$ (10).

Results

The anthropometric data are summarized in Table 2; no differences between groups were observed. Furthermore, no difference was found before and after training for the mass of the climbers (less than 1%).

Maximal Force

There were no significant differences between the experimental group and the control group when variables were expressed in absolute values. Nevertheless, the normalized values did reveal a significant effect for the right slope crimp ($F_{(1.12)} = 7.56$; $p = 0.02$, $\eta^2 = 038$ and $\beta = 0.71$). The post hoc Fisher's test revealed an effect of training for the experimental group ($p = 0.03$) and in the posttest between both groups ($p = 0.02$) (Table 3).

Rate of Force Development

For the experimental group, the mean values for $RFD_{95\%}$ were 379.66 ± 182.75 $N \cdot s^{-1}$ before training and 398.87 ± 161.92 $N \cdot s^{-1}$ after training, for the full crimp; 342.12 ± 150.15 $N \cdot s^{-1}$ and 423.41 ± 195.93 $N \cdot s^{-1}$ for the slope crimp; and 343.92 ± 150.30 $N \cdot s^{-1}$ and 414.74 ± 138.86 $N \cdot s^{-1}$ for the half crimp. For the control group, the mean value was 295.4 ± 162.45 $N \cdot s^{-1}$ before training and 322.89

Table 3. Normalized (force divided by body mass Fn) and absolute finger grip force (F) for the 3 hold conditions.*

	Control group			Training group			ANOVA
Crimp	Pretest	Posttest	Difference (%)	Pretest	Posttest	Difference (%)	
Fn slope L	0.72 ± 0.05	0.75 ± 0.06	4	0.83 ± 0.05	0.91 ± 0.06	8.8	NS
F slope L	459.51 ± 62.68	468.70 ± 59.65	2.0	521.55 ± 36.15	566.54 ± 64.44	7.9	NS
Fn slope R	0.75 ± 0.05	0.71 ± 0.07	−5.6	0.82 ± 0.05	0.88 ± 0.07	6.9†	$F_{(1,12)} = 7.56$ $p = 0.02$
F slope R	476.55 ± 74.38	448.57 ± 84.62	−6.3	509.79 ± 51.28	548.11 ± 69.15	7	NS
Fn half L	0.74 ± 0.05	0.75 ± 0.06	1.4	0.83 ± 0.05	0.88 ± 0.06	5.7	NS
F half L	468.74 ± 61.89	472.42 ± 70.22	0.8	517.98 ± 51.23	548.13 ± 55.38	5.6	NS
Fn half R	0.76 ± 0.05	0.75 ± 0.05	−1.3	0.83 ± 0.06	0.89 ± 0.06	6.8	NS
F half R	484.84 ± 66.64	467.74 ± 46.69	−3.7	517.23 ± 64.88	551.04 ± 52.48	6.2	NS
Fn full L	0.65 ± 0.07	0.66 ± 0.08	1.6	0.82 ± 0.07	0.87 ± 0.08	5.7	NS
F full L	415.65 ± 84.44	411.94 ± 91.26	−0.9	505.68 ± 40.86	535.89 ± 33.72	5.7	NS
Fn full R	0.71 ± 0.08	0.69 ± 0.08	−2.7	0.82 ± 0.09	0.87 ± 0.08	5.8	NS
F full R	448.84 ± 75.74	434.51 ± 105	−3.3	508.13 ± 43.84	535.29 ± 38.22	5.1	NS

*ANOVA = analysis of variance; L = left hand; R = right hand; NS = non significant.
†When statistical difference at $p < 0.01$.

± 182.60 $N \cdot s^{-1}$ after training, for the full crimp; 367.04 ± 240.60 $N \cdot s^{-1}$ and 377.44 ± 240.65 $N \cdot s^{-1}$ for the slope crimp; and 357.70 ± 142.27 $N \cdot s^{-1}$ and 305.89 ± 125.66 $N \cdot s^{-1}$ for the half crimp. There is no significant difference in $RFD_{95\%}$ between the experimental and control groups.

Concerning the $RFD_{200\ ms}$, difference was found for any condition (Figure 4). For the right slope crimp, a significant effect was found ($F_{(1,12)} = 9.62$; $p = 0.009$, $\eta^2 = 0.44$ and $\beta = 0.812$) between the experimental and control groups. The post hoc Fisher's test reveals an effect of training for the experimental group ($p \leq 0.05$). For the left slope crimp, a significant effect was found ($F_{(1,12)} = 10.13$; $p = 0.008$, $\eta^2 = 0.46$ and $\beta = 0.83$) between the experimental and control groups. The post hoc Fisher's test reveals an effect of training for the experimental group ($p \leq 0.05$). For the half crimp, a significant effect was found with ($F_{(1,12)} = 11.18$; $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.48$ and $\beta = 0.86$) for the right hand and ($F_{(1,12)} = 10.18$; $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.47$ and $\beta = 0.85$) for the left between

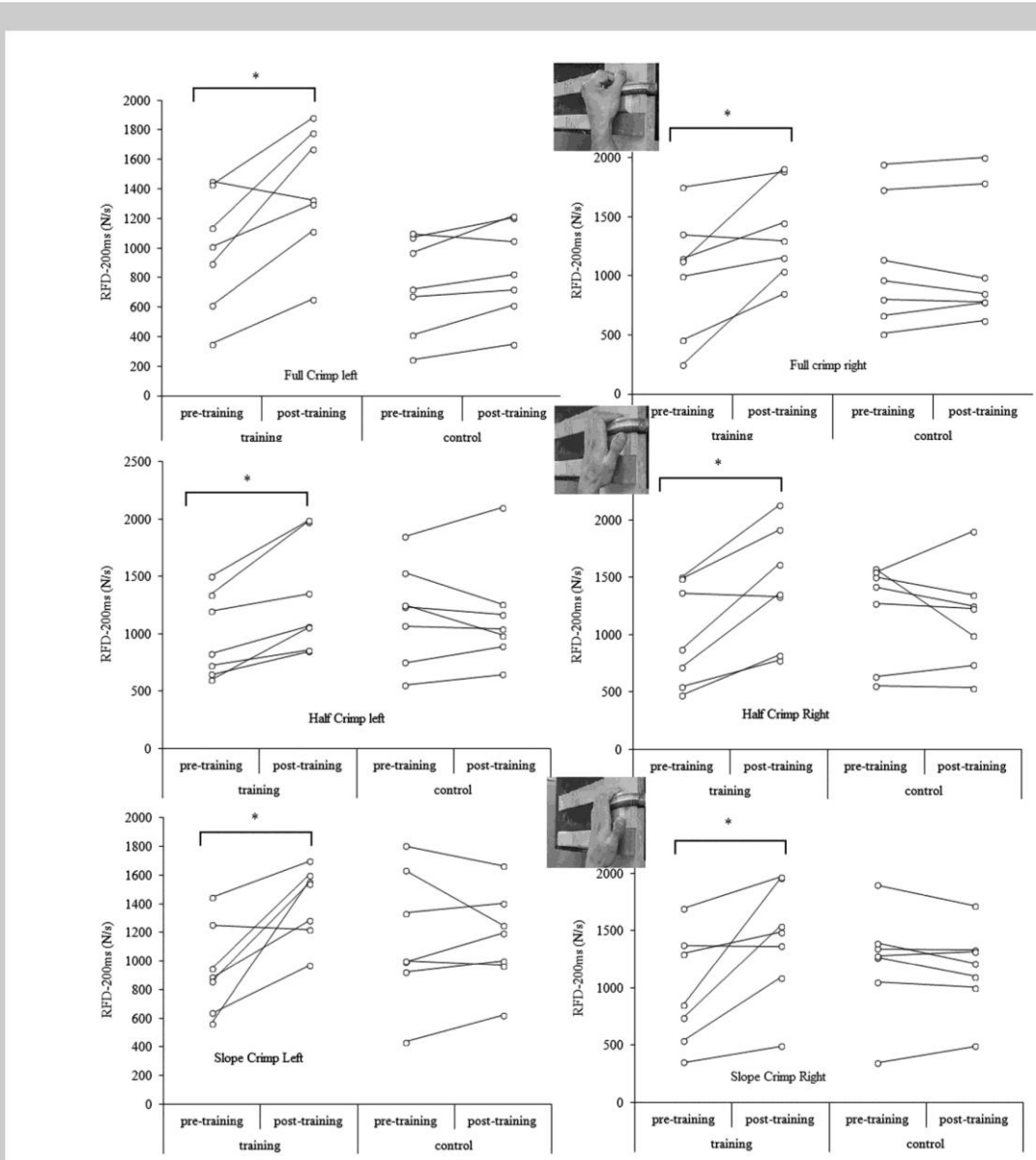


Figure 4. Individual changes of the rate of force development (RFD) at 200 ms before and after protocol for training group (left) and control group (right) for the full, half, and slope crimp. *Significant changes at $p \leq 0.05$.

Table 4. Result for $RFD_{200\ ms}$ ($N \cdot s^{-1}$) before and after training for the experimental and control groups.*

	Training group			Control group		
Crimp	Pretest	Posttest	Difference (%)	Pretest	Posttest	Difference (%)
Slope L	942.00 ± 314.68	1,407.50 ± 259.23	33.1†	1,161.29 ± 464.49	1,157.29 ± 334.57	<1
Slope R	978.29 ± 488.06	1,412.86 ± 513.52	30.9†	1,225.14 ± 465.21	1,168.29 ± 374.15	−4.2
Half L	978.86 ± 363.97	1,304.71 ± 491.46	25.0†	1,177.14 ± 441.62	1,158.29 ± 460.41	<1
Half R	995.50 ± 446.02	1,418.79 ± 510.75	29.9†	1,215.00 ± 436.17	1,142.79 ± 445.43	−6.3
Full L	983.86 ± 405.88	1,386.79 ± 428.86	30.1†	742.00 ± 328.16	851.43 ± 323.01	13.1
Full R	1,011.79 ± 513.74	1,366.86 ± 407.07	26.0†	1,106.79 ± 540.15	1,112.86 ± 545.34	<1

*L = left hand; R = right hand.
†When statistical difference at $p \leq 0.05$.

the experimental and control groups. The post hoc Fisher's test reveals an effect of training for the experimental group ($p \leq 0.05$) for the left and right half crimps. Last, for the full crimp, a significant effect was found ($F_{(1,12)} = 7.36$; $p = 0.02$, $\eta^2 = 0.38$, with $\beta = 0.70$) for the right hand ($F_{(1,12)} = 6.39$; $p = 0.026$, $\eta^2 = 0.35$, with $\beta = 0.641$) and for the left hand between the experimental and control groups. The post hoc Fisher's test reveals an effect of training for the experimental group ($p \leq 0.05$) for the left and right full crimps. No difference was found for the control group between pretest and posttest. All averaged values are summarized in Table 4.

Discussion

The anthropometric characteristics of both samples are similar to those of elite climbers in the literature. Indeed, top-ranking and elite climbers in our study were thin (BM: 64.2 ± 3.5 kg) and lean (BF = 8.9 ± 2.2%), with a body mass index of 21.3 ± 2.0 $kg \cdot m^{-2}$, and an ape index of 1.02 ± 0.1. These values are close to those found in the literature for climbing, with averaged BM values of between 60 and 70 kg (36), BF percentage of between 5.1 and 9.2% (25,36), and an ape index of about 1.02 (20), showing that climbers have a longer arm span relative to their body size. This characteristic is very advantageous in climbing competition (19,25) allowing to take the holds more far and easily.

No significant difference between training and control groups (<1%) was found for any of the anthropometric variables. Moreover, pretest and posttest intra-subject differences were negligible (<1%). Thus, this lack of difference legitimizes the normalized measurement of maximal force. Indeed, the ratio of strength-to-body weight has been shown to be a determining factor of climbing ability (20,28).

The results for the experimental group before training show a mean value of 515 ± 43.5 N for the slope crimp, 517 ± 57.5 N for the half crimp and 507 ± 41.5 N for the full crimp. This is in line with previous studies of elite climbers, which recorded a mean value of 552 ± 42 N for the slope crimp (14), 532 ± 23 N for the half crimp (16) and 494 ± 64 N for the full crimp (23). These slight disparities with the literature (about 5%) can be explained by small variations in the initial position of the body. In our study, the arm was in the sagittal plane, with an angle of 20° with the body and an elbow angle of 90°. This probably allowed a small amount of force from the lattisimus dorsi to be made from a small contribution of the shoulder adduction during the isometric contraction. In the Fanchini study, the athlete was seated, with the arm and forearm stretched out (14), thus allowing for a higher contribution of scapulae muscles. Moreover, in the Laffaye study, the climbers were seated, with their arms resting on a table (20), thus reducing the contribution made by the lattisimus dorsi.

Our results show slight (less than 5%) and insignificant differences in the force developed as a function of grip conditions. To the best of our knowledge, only Amca's study with experienced climbers compared the values between these 3 grip techniques, revealing that climbers develop more force (+11%) in the full crimp (546.2 ± 40.9 N) compared with the half crimp (490.1 ± 37.4 N) and the slope crimp (+21%); (435.7 ± 41.6 N) (2). Moreover, a recent study (30) has shown that using the thumb during a hold produces an increase in the force of finger flexor of 12% (442 ± 42.9 N without thumb vs. 494 ± 68.8 N with thumb) during the full crimp. In our study, the results for the experimental group, before training, showed a maximal force for the half crimp of 517 ± 57.5 N, as opposed to 507 ± 41.5 N for the full crimp. These close and insignificant differences between the 2 crimps is contrary to the literature and can perhaps be explained by the fact that many of the French team's climbers prefer the half crimp and slope crimp for fear of injury when using the full crimp (17,29,31). Indeed, in the full crimp, the A2 and A4 pulleys (rings that hold the FSP and the FPF) are subjected to maximum pressure with the thumb closed (17,31), and in the

event of overloading, can even break. Amca et al. (2) recorded during the full crimp a tension of 254.8 N on the A2 pulley, whereas the A4 pulley received 220.9 N, for an external force of 95.6 N. On the contrary, in the slope crimp the tension was much lower (57.4 N for the A4 and 8.1 N for the A2 for the same external force) (35). According to Schweizer (32) in the full crimp position, at 25% of maximum strength, the A2 pulley received 3 times as much force applied on the fingers. Both these studies highlight a linear relationship between external force and tension for the A2 and A4 pulleys (35). These data suggest that for 505 N, which was developed by the climber of our study in the finger grip, the pressure of pulleys A2 and A4 received an overload that could damage this passive anatomic structure. Thus, it seems more reasonable to use the half crimp and the slope crimp in training rather than the full crimp to avoid injury.

With regard to the normalized values, there was a training-related increase for the right slope grip of 8% (0.82 ± 0.05 $N \cdot kg^{-1}$ before training vs. 0.88 ± 0.07 $N \cdot kg^{-1}$ after training). During the training modalities, the climbers had to make suspensions with a slope crimp grip, which may explain why the gain was obtained in the same conditions. This result is comparable to Maurizio's study of skilled climbers, which was based on a 4-week training program and gave results of a 5% increase in the half crimp. It also revealed that a 4-week training plan based on finger flexor muscular conditioning was sufficient to increase strength in elite climbers (14). The other conditions did not reveal any significant difference between the pretest and the posttest conditions for the experimental group, despite a slight increase of the maximal force for the full crimp and the half crimp (5.3 and 7.5% difference between the pretest and posttest for the full crimp and the half crimp). If insignificant, this reveals a possible transfer of force between the 3 conditions.

To the best of our knowledge, only 1 study has investigated the evolution of RFD for finger flexor with isometric contractions (14) in rock climbing. In this study, the authors showed normalized values of about 48 ± 18 $N \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$ for the full crimp. By standardizing these values to our units, boulderers can be seen to produce about 3,300 ± 1,200 $N \cdot s^{-1}$ in the full crimp. But in this study, the RFD was measured as the maximal value during the slope grip. Consequently, these values are not comparable with ours, which ranged for $RFD_{95\%}$ from 398.87 to 423.41 $N \cdot s^{-1}$ and from 742 to 1,418.79 $N \cdot s^{-1}$ for $RFD_{200\ ms}$ after a 4-week training. Methodological studies have suggested that focusing only on the RFD peak is not a relevant method because it only takes into account a part of the curve, which is highly sensitive to variability and sudden changes (6,8). Thus, its use is not recommended in functional actions, such as climbing. Rather, it is more accurate to investigate the evolution of force as a function of a given time (8) as we have done, by cutting the slope into 2 parts (at early phase at 200 ms and up to the plateau at 95% of the maximal force) for a better and a more accurate interpretation.

Although few studies on RFD and climbing exist, several studies have focused on this variable by characterizing the way in which the force is produced. For instance, Fanchini and White (14) showed that boulderers are able to develop more strength at a faster rate than lead climbers. This could be explained by the temporal characteristics of the event. Indeed, the duration of the effort was shorter in bouldering (30 seconds rather than 2–7 minutes lead climbing) with 7.5 seconds of static phase and 22.5 seconds of dynamic phase, with a long resting time (114.5 ± 30.7 s) between the 2 attempts (39). In bouldering, movements are more explosive and dynamic and thus necessitate taking small crimps; this implies that boulderers are able to develop a high level of force in a shorter time so as to be able to stabilize the body (14,39). Furthermore, Laffaye et al. (19) revealed that arm jumps feature an explosive movement over a shorter time. Thus, boulderers demonstrate a better index of efficiency than climbers of the same skill level. All these studies highlight the importance of producing a high level of force for the finger flexor in a small amount of time, i.e., a high value of RFD. Thus, the RFD is a key variable in efficient bouldering. Nonetheless, it has not been investigated in climbing, as is the case for other explosive sports such as sprinting (7) and jumping (11,22).

Our results show a significant increase in $RFD_{200\ ms}$ for the training group for the 3 conditions of crimps (half, slope, and full). A 32% gain for the slope crimp, a 27.5% gain for the half crimp, and a 28% for the full crimp was recorded, whereas no change was recorded for the control group, with changes of–3% for the half crimp and +6% for the full crimp.

According to the literature on RFD changes with training, a gain in the early part of the force-time curve is due to changes in the neural control of muscular contraction. Indeed, the activation of the muscle during a rapid and explosive contraction is mainly determined by the discharge of motor units, i.e., the neural factor (1). This discharge occurs at the start of the contraction and is decisive in the first 100–200 ms (34). The time for the experimental group to reach the maximal force in our study before training was 2.62 ± 0.36 seconds. As the typical time needed during a bouldering event will always be shorter than the time needed to achieve the maximal force, increasing the RFD is, therefore, a crucial way to increase performance.

The change of $RFD_{200\ ms}$ is due to an increase in the motor unit discharge and the contractile impulse, as suggested by Aagaard et al. (1). A gain later in the force-time curve, i.e., in the second part of the RFD, is linked closely to changes in the tendon-muscle coupling and to the contractile properties of the muscle, which increase later in the RFD curve (34). The RFD is a factor which is primarily affected by training (9,13), before the maximal force is achieved. These indications are confirmed by Tillin et al. (33), who explained that isometric-type exercises would improve muscle activation. Based on this idea, we can hypothesize that the specific training performed by climbers is primarily

impacted by the neural factor and by a probable increase in the discharge of the motor units. Therefore, a 4-week training program is sufficient to increase the force and RFD for the finger flexor for both elite and top world-ranking boulderers.

On the other hand, the training did not have an effect on the absolute $RFD_{95\%}$. The literature of RFD gain with training highlights that a gain on absolute RFD of the force-time curve is a combination of changes in the neural factor in the early phase and changes in the musculo-tendinous structure. The contractile properties and the architecture of the muscle (the number of type II and I fibers) are also involved in the increase in RFD (34). The fact that there is no effect on the $RFD_{95\%}$ tells us that a 4-week training had probably no impact on the structural factors (i.e., the muscle architecture, cross-sectional area, and type fibers II) (3), but had an important impact on the neural factor, more particularly on the increase of the discharges of the motor units, as suggested by the gain obtained during the first 200 ms. It would be interesting to confirm this conjecture in future studies by measuring how muscular-tendon architecture evolves with training.

Last, the training workouts were based on the slope and half crimps, and the gain of $RFD_{200\ ms}$ was significant for all conditions. This transfer could be explained by the muscles involved during the 3 conditions. Indeed, the half crimp necessitates the activation of the flexor digitorum profundus (FDP) and flexor digitorum superficialis (FDS) using an angle of the IPP of about 90° and a 0° angle of the IPD. The full crimp necessitates an angle of 90° of the IPP and an hyperextension of the IPD because of the action of the thumb on the dorsal side of the other fingers. This action involves both muscles, FDP and FDS, but with a dangerous pressure of the A2 and A4 pulleys. In other terms, using the half crimp grip allows the climbers to increase the RFD on the full crimp without increasing the risk of injuries on the pulley.

This study is the first to investigate RFD changes with training in elite and top world-ranking climbers. The first row of data offers some interesting information about the way the force was improved. We made the choice to investigate the slope of the force production in the first 200 ms and until the plateau of force is reached to gain a better understanding of the internal processes. To gain a more in-depth and accurate comprehension of this phenomena, a data recording at 1,000 Hz would be useful in giving us an understanding of what happens in the first 50 or 100 ms, which is known to be a signature of the peak of the RFD. We could then compare this peak with an RFD value over a given time (24). Moreover, it would be interesting to know how long this gain of force and RFD can last. This was difficult to measure with top world-ranking climbers because the scientific protocol requires them to change their training schedule during the experiment. It would be difficult to ask climbers who are preparing for international competition to miss specific training so as to have a control group.

Furthermore, considering the few studies that have investigated the link between RFD and the climbing performance, we encourage future research to characterize the constraints of force and time during bouldering and lead climbing for a better understanding of the way the force is produced in both sub-disciplines. More accurately, it could be useful to investigate the threshold of normalized force sufficient to gain and maintain the control of a hold and the time necessary to reach this force. The literature of RFD may be more important in climbing and having more information on this topic, such as typical values in different levels of expertise seem important to monitor climbers' performance.

Practical Applications

The goal of this study was to show the impact of a 4-week training program on finger flexor force and the RFD in elite and top world-ranking boulderers.

Results reveal a gain of force and RFD in the early phase of the slope (200 ms) of finger flexor for all hold conditions. Concerning the finger flexor force, there was a significant gain for the right slope crimp (with an 8% difference between the group control and the experimental group). In addition, there was an evolution of the force exerted during the other holds (5.3 and 7.5% difference between pretest and posttest for the full crimp and the half crimp). Thus, 4 weeks were seen to be enough to improve the level of maximum force in elite climbers. Increasing the maximal force of the finger flexor is also of importance for climbers of difficulty and bouldering (20,21), and such a training plan could be useful for both sub-disciplines.

The gain of RFD in the first 200 ms of the slope of the force is very high (between 27.5 and 32% for averaged conditions), revealing a gain in the neural factor rather than a change in the muscle-tendon structure. Reaching a high level of force in a small amount of time is highly important because the constraints of international bouldering competitions necessitate dynamic movements with a high level of holding force (39) in a short amount of time. Considering the fact that climbing makes its appearance in the 2020 Olympic Games in Tokyo in the form of a combined competition, i.e., bouldering, speed climbing, and lead climbing, it will be crucial for each athlete to be able to develop a high level of force and of RFD in especially 2 events. Like bouldering, lead climbing requires a high level of finger flexors (14,20).

Furthermore, our study reveals that there was an increase of the $RFD_{200\ ms}$ for all the condition crimps, whereas the training plan was based on isometric contractions in the slope and half crimp grips, suggesting a possible transfer of force between the crimps. This result could help trainers to manage the gain of force and the prevention of injury. Indeed, the full crimp overloads the A2 pulley at maximum pressure, which could be broken when overused. Our study suggests that it is not necessary to work specifically on the full crimp grip to increase the force in this position; rather, working with the half crimp or the slope crimp grip can

result in an increase in finger flexor force and rate of force for all grips.

Acknowledgments

The authors thank the head coaches of the national climbing federation, Mr Januel Nicolas and Mr Remi Samyn, for the design of the training plane, their valuable advices, and the members of the French climbing team. The authors have no conflicts of interest to disclose.

References

1. Aagaard, P, Simonsen, EEB, Andersen, JL, Magnusson, P, and Dyhre-Poulsen, P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol (1985)* 93: 1318–1326, 2002.
2. Amca, AM, Vigouroux, L, Aritan, S, and Berton, E. Effect of hold depth and grip technique on maximal finger forces in rock climbing. *J Sports Sci* 30: 669–677, 2012.
3. Andersen, LL and Aagaard, P. Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur J Appl Physiol* 96: 46–52, 2006.
4. Atkinson, G and Nevill, AM. Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sport Med* 26: 217–238, 1998.
5. Baker, D, Wilson, G, and Carlyon, B. Generality versus specificity: A comparison of dynamic and isometric measures of strength and speed-strength. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68: 350–355, 1994.
6. Bellumori, M, Jaric, S, and Knight, CA. The rate of force development scaling factor (RFD-SF): Protocol, reliability, and muscle comparisons. *Exp Brain Res* 212: 359–369, 2011.
7. Beneke, R and Taylor, MJD. What gives Bolt the edge-A. V. Hill knew it already!. *J Biomech* 43: 2241–2243, 2010.
8. Casartelli, NC, Lepers, R, and Maffiuletti, NA. Assessment of the rate of force development scaling factor for the hip muscles. *Muscle Nerve* 50: 932–938, 2014.
9. Caserotti, P, Aagaard, P, Buttrup Larsen, J, and Puggaard, L. Explosive heavy-resistance training in old and very old adults: Changes in rapid muscle force, strength and power. *Scand J Med Sci Sports* 18: 773–782, 2008.
10. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences Lawrence Earlbaum Associates.* New York: Routledge, 1988. pp. 20–26.
11. Dapena, J and Chung, CS. Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Med Sci Sports Exerc* 20: 290–302, 1988.
12. Donath, L and Wolf, P. Reliability of force application to instrumented climbing holds in elite climbers. *J Appl Biomech* 31: 377–382, 2015.
13. Duchateau, J and Hainaut, K. Isometric or dynamic training: Differential effects on mechanical properties of a human muscle. *J Appl Physiol* 56: 296–301, 1984.
14. Fanchini, M, Violette, F, Impellizzeri, FM, and Maffiuletti, NA. Differences in climbing-specific strength between boulder and lead rock climbers. *J Strength Cond Res* 27: 310–314, 2013.
15. Ferguson, RA and Brown, MD. Arterial blood pressure and forearm vascular conductance responses to sustained and rhythmic isometric exercise and arterial occlusion in trained rock climbers and untrained sedentary subjects. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76: 174–180, 1997.
16. Grant, S, Hynes, V, Whittaker, A, and Aitchison, T. Anthropometric, strength, endurance and flexibility characteristics of elite and recreational climbers. *J Sports Sci* 14: 301–309, 1996.
17. Hochholzer, T and Schöffl, V. Climbing: injuries and trauma: preventing and curing them. *Glénat* 2012.
18. Kawamori, N, Rossi, SJ, Justice, BD, Haff, EE, Pistilli, EE, O'Bryant, HS, Stone, MH, and Haff, GG. Peak force and rate of force development during isometric and dynamic mid-thigh clean pulls performed at various intensities. *J Strength Cond Res* 20: 483–491, 2006.
19. Laffaye, G, Collin, JM, Levernier, G, and Padulo, J. Upper-limb power test in rock-climbing. *Int J Sports Med* 35: 670–675, 2014.
20. Laffaye, G, Levernier, G, and Collin, J-M. Determinant factors in climbing ability: Influence of strength, anthropometry, and neuromuscular fatigue. *Scand J Med Sci Sports* 26: 1151–1159, 2015.
21. López-Rivera, E and González-Badillo, JJ. The effects of two maximum grip strength training methods using the same effort duration and different edge depth on grip endurance in elite climbers. *Sport Technol* 5: 37–41, 2012.
22. Luhtanen, P and Komi, PV. Mechanical power and segmental contribution to force impulses in long jump take-off. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 41: 267–274, 1979.
23. MacDonald, JH and Callender, N. Athletic profile of highly accomplished boulderers. *Wilderness Environ Med* 22: 140–143, 2011.
24. Maffiuletti, NA, Aagaard, P, Blazevich, AJ, Folland, J, Tillin, N, and Duchateau, J. Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol* 116: 1091–1116, 2016.
25. Magiera, A and Roczniok, R. The climbing preferences of advanced rock climbers. *Hum Mov* 14: 254–264, 2013.
26. Magiera, A, Roczniok, R, Maszczyk, A, Czuba, M, Kantyka, J, and Kurek, P. The structure of performance of a sport rock climber. *J Hum Kinet* 36: 107–117, 2013.
27. Medernach, JP, Kelinöder, H, and Lötzerich, HH. Fingerboard in competitive bouldering: Training effects on grip strength and endurance. *J Strength Cond Res* 29: 2286–2295, 2015.
28. Mermier, CM, Janot, JM, Parker, DL, and Swan, JG. Physiological and anthropometric determinants of sport climbing performance. *Br J Sports Med* 34: 359–365, 2000; discussion 366.
29. Morenas Martín, J, Del Campo, VL, Leyton Román, M, Gómez-Valadés Horrillo, JM, and Gómez Navarrete, JS. Description of the finger mechanical load of climbers of different levels during different hand grips in sport climbing. *J Sports Sci* 31: 1713–1721, 2013.
30. Quaine, F, Vigouroux, L, Paclet, F, and Colloud, F. The thumb during the crimp grip. *Int J Sports Med* 32: 49–53, 2011.
31. Schöffl, I, Einwag, F, Strecker, W, Hennig, F, and Schöffl, V. Impact of taping after finger flexor tendon pulley ruptures in rock climbers. *J Appl Biomech* 23: 52–62, 2007.
32. Schweizer, A. Biomechanical properties of the crimp grip position in rock climbers. *J Biomech* 34: 217–223, 2001.
33. Tillin, NA and Folland, JP. Maximal and explosive strength training elicit distinct neuromuscular adaptations, specific to the training stimulus. *Eur J Appl Physiol* 114: 365–374, 2014.
34. Tillin, NA, Jimenez-Reyes, P, Pain, MTG, and Folland, JP. Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. *Med Sci Sports Exerc* 42: 781–790, 2010.
35. Vigouroux, L, Goislard de Monsabert, B, and Berton, E. Estimation of hand and wrist muscle capacities in rock climbers. *Eur J Appl Physiol* 115: 947–957, 2015.
36. Watts, PB, Daggett, M, Gallagher, P, and Wilkins, B. Metabolic response during sport rock climbing and the effects of active versus passive recovery. *Int J Sports Med* 21: 185–190, 2000.
37. Watts, PB, Joubert, LM, Lish, AK, Mast, JD, and Wilkins, B. Anthropometry of young competitive sport rock climbers. *Br J Sports Med* 37: 420–424, 2003.
38. Watts, PB, Martin, DT, and Durtschi, S. Anthropometric profiles of elite male and female competitive sport rock climbers. *J Sports Sci* 11: 113–117, 1993.
39. White, DJ and Olsen, PD. A time motion analysis of bouldering style competitive rock climbing. *J Strength Cond Res* 24: 1356–1360, 2010.

ANNEXE 3 : 2ND ARTICLE PUBLIE, 2019

Levernier, G. and G. Laffaye. 2019
Rate of Force Development and Maximal Force : Reliability and Difference between Non-Climbers , Skilled and International Climbers.
"*Sports Biomechanics"* 1–12.

SPORTS BIOMECHANICS
https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1584236

Routledge
Taylor & Francis Group

Check for updates

Rate of force development and maximal force: reliability and difference between non-climbers, skilled and international climbers

Guillaume Levernier[a,b] and Guillaume Laffaye[a,b]

[a]Sport Science Department, Complexity, Innovations, Motor and Sport Activities, University of Paris-Sud, Orsay, France; [b]Sport Science Department, Complexity, Innovations, Motor and Sport Activities, University of Orleans, Orleans, France

ABSTRACT

The goal of this study was to assess (i) test–retest reliability between sessions and within sessions, and (ii) the difference among three skill levels (international $n = 12$, skilled $n = 10$ and non-climbers $n = 9$) for finger flexor maximal force (Fmax) and rate of force development (RFD) at different time scales. Each climber performed a maximal finger flexion on a dynamometer in two different conditions: half crimp and slope crimp. The inter-session revealed no difference with low to high correlation from 0.56 to 0.94. Intra-session reliability reveals intraclass correlation ranging from 0.40 to 0.98 for all groups. The coefficients of variation ranged from 7.77% to 28.34% for RFD and 2.90% to 9.99% for Fmax. Maximal force, expressed as an absolute or normalised value, reveals a significant difference between all samples (22.11% difference between international and 38.58% between skilled and non-climbers). Finally, the difference in RFD_{200ms} and $RFD_{95\%}$ among the three groups suggests that the practice of intensive climbing causes many changes in neural and structural factors. Last, RFD_{200ms} and $RFD_{95\%}$ are highly reliable and can be used to discriminate samples, suggesting that these variables could be used in monitoring training.

ARTICLE HISTORY
Received 21 June 2018
Accepted 13 February 2019

KEYWORDS
Finger; strength; climbing; isometric contractions

Introduction

Boulderers climb indoors on artificial walls without the use of ropes, and used only climbing shoes to secure footholds, chalk to keep their hands dry and a mat to soften falls. This practice is characterised by a number of complex and explosive movements (between two and nine movements).

When focusing on the temporal characteristic of bouldering during competition, there are three times more dynamic phases (22.3 ± 2.1s) than static phases (7.5 ± 1.6s) (White & Olsen, 2010). During dynamic movements, such as the dyno, the power of the upper limb is determinant, particularly from the muscles flexing the arm with forearm (biceps brachialis, brachialis). Many authors reveal that bouldering requires significant upper-limb strength (Fanchini, Violette, Impellizzeri, & Maffiuletti, 2013; Laffaye, Collin, Levernier, & Padulo, 2014; Magiera et al., 2013). For instance, Laffaye, Levernier, and Collin (2015) show that upper-limb power and finger strength are

CONTACT Guillaume Laffaye guillaume.laffaye@u-psud.fr

© 2019 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

crucial for high performance. Another study reveals 16.70% higher performance obtained between elite and skilled climbers during an arm jump test, and 23.30% between skilled and novice climbers (Laffaye et al., 2014). Boulderers use an explosive movement whereas lead climbers use a slower one. Explosive force is of great importance in climbing and is defined as 'the capacity to increase contractile force from a low or resting level as quickly as possible' (Folland, Buckthorpe, & Hannah, 2014).

Furthermore, the ability to hold a crimp solicits specific hand and finger muscles, such as the finger flexor digitorum profundus and the flexor digitorum superficialis. In bouldering, as the level of difficulty increases, the size of the holds to be managed decreases. Many studies (Amca, Vigouroux, Aritan, & Berton, 2012; Laffaye et al., 2015; López-Rivera & González-Badillo, 2012) show that muscle strength is a key factor differentiating elite and skilled climbers, with elite climbers having 22.19% greater finger grip strength than skilled climbers who have 44.85% greater strength than novices (Laffaye et al., 2015). Moreover, strength depends on the kind of crimps. Amca et al. (2012) show that climbers develop more force (+17.93%) for a 100-mm hold using a full crimp than using a half crimp or a slope crimp (+20.21%).

Climbers have very little time to grip strongly during these dynamic movements. This ability to develop a high level of force in a short time, that is, the rate of force development (RFD), appears to be highly determinant in rock climbing. However, few studies have investigated this variable, despite its apparent importance in rock climbing. Fanchini et al. (2013) revealed that the peak of RFD during a task of isometric flexor of fingers is 36.73% higher in boulderers than in lead climbers. Another study reveals typical values ranging between 740 N/s and 1400 N/s for international climbers in RFD at 200 ms and between 240 N/s and 423 N/s for RFD at 95% of maximal force during a half crimp and full crimp (Levernier & Laffaye, 2017). During functional movements such as climbing, the mean value of RFD at different time scales is more accurate and offers more interesting and relevant information about the way the force is output (Maffiuletti et al., 2016). In such a methodological disagreement, it appears necessary to assess the validity and reproducibility of RFD for the finger flexor and the relevance of this variable in discriminating different skill levels in climbing.

Based on this theoretical background, it is hypothesised: (i) there is a high reliability for test–retest between sessions and within sessions for the recorded variables, (ii) there is significant difference among three skill levels (international, skilled and non-climbers) for maximal force and the rate of force development of finger flexors at different time scales.

Methods

Participants

Thirty-one participants (12 international, 10 skilled and 9 non-climbers) were divided into three groups according to their skill levels based on the French Fbrating (Fb corresponds to Fontainebleau, a rating scale used in bouldering). They were categorised as non-climbers (<5b), skilled (7c–8a) or international (≥ 8b). The international climbers train six times per week and participate at the international competition, skilled train four times per week, and non-climbers did not practice climbing. During

the experiment, the number of training does not change for each group. None of the climbers had suffered any injuries to the hands or upper limbs during the past 10 months. For this study, all participants performed the trials at the same time of day to eliminate any influence of circadian variation. They all signed a consent statement explaining the test conditions and risks. This research protocol was approved by the University of Paris-Sud ethical committee.

Procedure

The experiment took place between April 2017 and July 2017. The participants were international, skilled and non-climbers. The aim was to analyse both RFD and maximal force (Fmax) and to assess the inter and intra session reliability (Maffiuletti et al., 2016). For this purpose, all participants visited the laboratory two times to record force and anthropometric measurements. The procedure was repeated in a second session separated by 10 ± 2 days for all participants, for each group. The climbers (international and skilled) were instructed not to follow specific finger training during the experimental period.

The climbers stood motionless, one hand on the dynamometer and the opposite arm hanging alongside the body (see Figure 1). The angle between the arm and the chest was 90° in the sagittal plane and the angle between the arm and the forearm was set at 90°. The angle between chest and the upper arm in the transverse plane was 20°.

A visual control of the angle before the climber begins his action on the dynamometer was used to check the aforementioned postural advices. We adjusted the height



Figure 1. Position of the climber during the test. The climbers stood motionless, one hand on the dynamometer and the opposite arm hanging alongside the body and then performed a maximal finger flexion on a dynamometer.

of the measurements apparatus according to each participant. Before each flexion, participant can use chalk to remove the moisture on the hands and after to remove excess chalk to avoid damaging the dynamometer.

They performed a maximal finger flexion on a dynamometer in two different conditions: half crimp and slope crimp. The slope crimp is characterised by a flexion of the distal interphalangeal (IPD) and a little flexion of the proximal interphalangeal (IPP). For the half crimp, the angle of the IPP is 90° with an extension for the IPD. This procedure was described by Levernier and Laffaye (2017) and is shown in Figure 2. Full crimp was voluntarily not used to avoid injury by a higher solicitation of A2 and A4 pulleys (rings that hold flexor digitorum profundus and the flexor digitorum superficialis) that are subjected to a lot of pressure with the thumb closed and could be broken (Hochholzer & Schöffl, 2012; Schöffl, Einwag, Strecker, Hennig, & Schöffl, 2007).

The dynamometer was blocked by three pieces of wood (see Figure 2). In addition, a strap prevented it from falling. Climbers apply a vertical force directly on the dynamometer. The surface of the contact between the fingers and the dynamometer was 10 mm × 120 mm. To prevent injury, all participants performed the same 30-min warm-up prior to the test. They were instructed to apply vertically downwards force on the dynamometer with their fingers as tightly and as quickly as possible with each hand three times. Moreover, a 3-min resting time between each trial and 5-min rest under both conditions (half crimp and slope crimp) were respected. Three trials were performed for each grip condition in a random order to avoid order effect.

Two international climbers produced a higher force than their own weight (normalised values higher than 1), which necessitates to hold their feet to the ground during the test.

Data collection

Anthropometrical data (weight, percentage of fatty and muscular mass) were recorded using a Tanita BC 545n InnerScan (TANITA, Amsterdam, The Netherlands) anthropometer with 0.1 cm accuracy and with an impedance balance. The climbers were instructed to restrain any caffeine or alcohol consumption in the 12 h before the test.

For evaluate the Fmax and the RFD, a PGM dynamometer (SENSIX, biopôle, 4 rue Carol Heitz, 86,000 Poitiers, France) calibrated at a frequency of 1000 Hz was used to measure maximal force and the rate of force development. The data were stored on a computer with an acquisition card for further analysis. The method of Tillin and

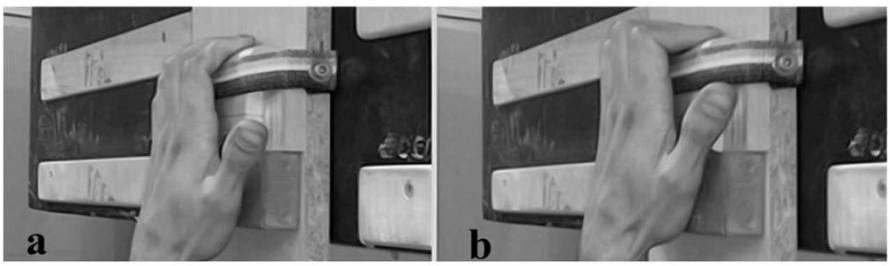


Figure 2. Slope (A) and half crimp (B). The slope crimp is characterised by a flexion of the distal interphalangeal (IPD) and a little flexion of the proximal interphalangeal (IPP). For the half crimp, the angle of the IPP is 90° with an extension for the IPD.

Folland (2014) was used to determine the contraction onset of the unfiltered force-time curve, with a threshold of 4N to obtain a strong onset of force. Between each condition and each hand, the measures were calibrated at 0N. RFD was measured at three typical time scales: 50 ms, 100 ms and 200 ms, called, respectively, RFD_{50ms}, RFD_{100ms} and RFD_{200ms}, and at 95% of the Fmax ($RFD_{95\%}$). They are shown in Figure 3.

This scaling makes it possible to dissociate explosive muscle strength (Aagaard, Simonsen, Andersen, Magnusson, & Dyhre-Poulsen, 2002), defined as 'the rise in the contractile force at the onset of contraction, the rate of force development exerted within the early phase of rising muscle force, within the initial 100–200 ms of contraction'. $RFD_{95\%}$ was considered as absolute RFD, between the onset and the value of force obtained during the plateau corresponding to the total contractile impulse (Maffiuletti et al., 2016). Considering the difficulty in maintaining the plateau over a long period of force, a value of 95% of maximal force is considered as a more accurate way to measure absolute RFD (Levernier & Laffaye, 2017). Fmax was recorded in absolute and normalised (divided by body weight) values.

Data analyses

All descriptive statistics were used to verify whether the basic assumption of normality of all studied variables was met. Statistical tests were processed using STATISTICA software (version 10, StatSoft, Inc., Tulsa, USA).

To assess the reliability of our method, intraclass correlation (ICC) and coefficients of variation were calculated intra-session for all three trials in each condition and for each group. According to Atkinson and Nevill (1998), ICC>0.8 and CV<10% are guarantees of excellent reliability. Moreover, inter-session reliability was assessed using a T-test and a correlational study. Three international climbers were excluded from the inter-session protocol because they had not complied with the instruction not to have an exhausting workout the day before the first session experiment.

To assess the difference between samples, a one-way analysis of variance was performed (ANOVA) with a Fisher post-hoc test and power (1-β). Significance was

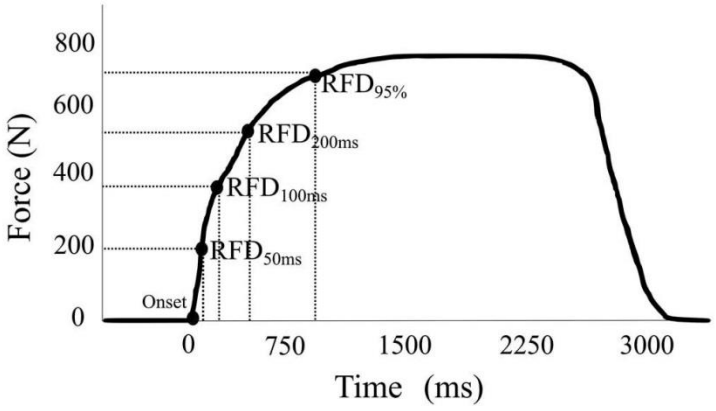


Figure 3. Typical force–time curve during an isometric contraction of finger during a slope crimp with Fmax, RFD_{50ms}, RFD_{100ms}, RFD_{200ms} and $RFD_{95\%}$. RFD: rate of force development and Fmax for maximal force.

set at $p < 0.05$ and effect size (η^2) was defined as small for $\eta^2 > 0.01$, medium for $\eta^2 > 0.09$, and large for $\eta^2 > 0.25$ (Cohen, 1988). Only the averaged values of the first session were kept for this hypothesis.

Two of the international climbers, one of the skilled climbers and two of the non-climbers were left handed dominant and all the other participants were right hand dominant. Consequently, we analyse the hand dominant vs. the hand non-dominant rather than the right hand versus the left one.

Results

Intra-session reliability of RFD reveals averaged ICC ranging from 0.74 to 0.90 for international climbers, 0.58 to 0.98 for skilled climbers and 0.40 to 0.91 for non-climbers. CV ranged from 7.77% to 16.22% for international, 9.83% to 28.34% for skilled and 12.56% to 25.44% for non-climbers. Averaged ICC for maximal force ranged from 0.95 to 0.98 for international, 0.94 to 0.99 for skilled and 0.89 to 0.92 for non-climbers. CV ranged from 2.90% to 4.33% for international 2.64% to 5.93% for skilled and ranged from 5.46% to 9.99%for non-climbers (see Table1).

Inter-session reliability revealed no difference (all $T < 1$). The coefficients of correlation between the first and second sessions ranged from 0.56 to 0.94 ($p < 0.001$; η^2 between 0.31 and 0.92). High correlations (>0.80) were found for the following variables: Fmax, $RFD_{95\%}$ (only for the dominant slope crimp), RFD_{200ms} (dominant and non-dominant half crimp), RFD_{100ms} (dominant and non-dominant half crimp) and RFD_{50ms} (dominant slope crimp, dominant and non-dominant half crimp). Low correlations ($r < 0.60$) were found for the RFD_{200ms} (non-dominant slope crimp). Moderate correlations ($0.60 < r < 0.80$) were found for the other variables.

Anthropometric characteristics are presented in Table 2. They were many differences between international, skilled and non-climbers for the weight, the body mass index and the percentage of body fat.

Table 1. Mean of intraclass correlation (ICC) and coefficient of variation (CV) for $RFD_{50.100.200ms}$ and $_{95\%}$. RFD: rate of force development. F_{max} for maximal force.

	Session 1				Session 2			
	Slope crimp		Half crimp		Slope crimp		Half crimp	
	CV	ICC	CV	ICC	CV	ICC	CV	ICC
International								
RFD_{50ms}	11.52	0.87	10.45	0.79	12.18	0.88	11.43	0.78
RFD_{100ms}	13.21	0.84	12.40	0.81	15.75	0.84	14.46	0.77
RFD_{200ms}	7.77	0.90	10.60	0.87	12.36	0.89	9.89	0.81
$RFD_{95\%}$	12.63	0.76	12.56	0.76	15.03	0.83	16.22	0.74
Fmax	3.97	0.98	3.56	0.97	2.90	0.98	4.33	0.95
Skilled								
RFD_{50ms}	19.70	0.89	10.03	0.69	20.50	0.79	15.55	0.60
RFD_{100ms}	18.20	0.72	9.83	0.67	13.51	0.58	14.74	0.67
RFD_{200ms}	12.94	0.80	10.17	0.98	15.99	0.87	10.51	0.76
$RFD_{95\%}$	16.34	0.73	15.17	0.65	28.34	0.73	17.17	0.75
Fmax	5.93	0.96	2.64	0.96	3.98	0.99	3.92	0.94
Non-climbers								
RFD_{50ms}	15.57	0.66	21.01	0.74	18.52	0.60	15.32	0.85
RFD_{100ms}	15.63	0.80	13.45	0.45	16.96	0.60	18.83	0.59
RFD_{200ms}	16.08	0.60	12.56	0.91	14.91	0.65	13.80	0.78
$RFD_{95\%}$	23.83	0.74	25.44	0.70	18.52	0.40	24.16	0.55
Fmax	9.99	0.92	5.61	0.90	5.46	0.91	6.42	0.89

Table 2. Anthropometric characteristics of the three samples. BMI for body mass index, S1: first session, S2: second session.

	Age (years)	Height (cm)	BMI (S1) (kg/m^2)	Mass (S1) (kg)	Mass (S2) (Kg)	% of body fat (S1)	% of body fat (S2)
International	24.6 ± 3.6	175.4 ± 5.4	21.2 ± 1.7*	64.8 ± 7.3*	65.7± 6.9*	9.5 ± 2.5*	9.8 ± 1.6*
Skilled	26.8 ± 7.2	177.3 ± 0.6	20.9 ± 2.1*	65.3 ± 6.2*	66.2 ± 5.1*	9.3 ± 3.7*	10.3 ± 2.1*
Non-climbers	27.2 ± 3.2	178.3 ± 0.9	25.7 ± 4.5	81.4 ± 13.9	83.1 ± 15.5	17.7 ± 7.9	18.9 ± 5.3

* When statistical difference with non-climbers ($p < 0.005$)

Maximal force, expressed as an absolute or normalised value, reveals a significant difference for all conditions (see Table 3). The post-hoc Fisher test reveals a difference among all samples ($p < 0.001$).

RFD shows differences with respect to the time scale, as revealed by Figure 4. Concerning the RFD_{100ms}, there is a significant difference for the dominant slope crimp [F (2.28) = 6.37; $p = 0.005$, $\eta^2 = 0.32$ and $\beta = 0.86$]. For the RFD_{200ms}, there is a significant difference for the dominant slope crimp [F (2.28) = 10.58; $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.43$ and $\beta = 0.98$], for the non-dominant slope crimp [F (2.27) = 10.09; $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.43$ and $\beta = 0.97$], the dominant half crimp [F (2.28) = 8.51; $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.40$ and $\beta = 0.94$] and the non-dominant half crimp [F (2.28) = 6.89; $p = 0.004$; $\eta^2 = 0.35$ and $\beta = 0.89$]. For the $RFD_{95\%}$, there is a significant difference for the dominant slope crimp [F (2.28) = 12.22; $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.47$ and $\beta = 0.99$], for the non-dominant slope crimp [F (2.28) = 7.27; $p = 0.003$, $\eta^2 = 0.35$ and $\beta = 0.91$], for the dominant half crimp [F (2.28) = 9.02; $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.42$ and $\beta = 0.96$] and for the non-dominant half crimp [F (2.28) = 11.03; $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.46$ and $\beta = 0.98$].

Discussion and implications

The first goal of this study (i) was to assess the reliability for test–retest between sessions and within session for the recorded variables to help future researches to focus on the most reliable variables. Inter-session reliability was good, with the correlation coefficients ranging from 0.92 to 0.94 for Fmax and normalised Fmax, showing that this variable is highly constant along the time. The maximal force is the consequence of the cross section area (Cohen, Texier, Laffaye, Auvray, & Clanet, 2015). Indeed, when targeting on the maximal force without including the time to reach it, the contribution of the nervous central is negligible. Moreover, the results showed a high level of intra-session reliability for all groups for the maximal force (ICC between 0.89 and 0.99).

Table 3. Normalised (force divided by body weight) and absolute finger grip force (N) for the two hold conditions.

			International	Skilled	Non-climbers	η^2
Absolute Fmax	Slope crimp	Dominant	559.56 ± 71.46 †§	422.56 ± 67.37 *	268.96 ± 48.41	0.79
		Non-dominant	554.44 ± 75.23 †§	414.85 ± 51.82 *	258.97 ± 54.19	0.81
	Half crimp	Dominant	567.26 ± 70.45 †§	439.08 ± 52.59 *	267.38 ± 42.61	0.83
		Non-dominant	548.08 ± 77.95 †§	452.11 ± 44.79*	266.41 ± 54.81	0.78
Normalised Fmax	Slope crimp	Dominant	0.88 ± 0.09 †§	0.68 ± 0.13 *	0.35 ± 0.10	0.82
		Non-dominant	0.88 ± 0.12 †§	0.65 ± 0.10 *	0.34 ± 0.11	0.81
	Half crimp	Dominant	0.90 ± 0.11 †§	0.69 ± 0.10 *	0.35 ± 0.09	0.84
		Non-dominant	0.87 ± 0.10 †§	0.72 ± 0.10 *	0.35 ± 0.13	0.80

§ When statistical difference between international and skilled climbers ($p < 0.05$)
† When statistical difference between skilled and non-climbers ($p < 0.05$)
* When statistical difference between international and non-climbers ($p < 0.05$)

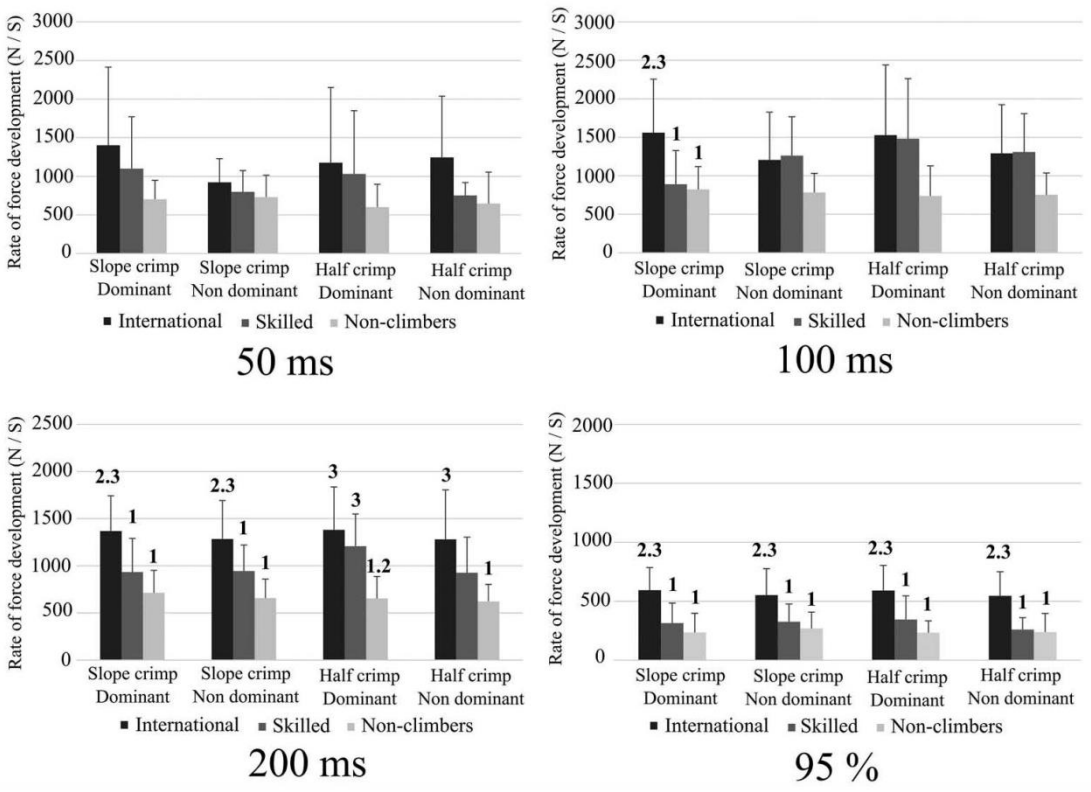


Figure 4. Difference between three samples for RFD_{50ms}, RFD_{100ms}, RFD_{200ms} and $RFD_{95\%}$ and for slope and half crimp. [1,2,3] when significant difference ($p < 0.005$).

When focusing RFD in regard with expertise, results show an increase of the values of ICC with skill level. Indeed, the ICC are excellent for international climber (0.74–0.90), good and excellent for skilled climbers (between 0.58 and 0.98). Tillin, Pain, and Folland (2013) showed comparable values of ICC (0.74–0.96) for the RFD. For non-climbers, the range of ICC values is important (between 0.40 and 0.91). Up to now, few studies have investigated the rate of force development, despite the high importance of this variable to raise the international level. When comparing our result with the study of Michailov et al. (2018), the ICC values found were 0.21 for the RFD. This huge difference could be explained by considering methodological aspect. Indeed, the typical curve during the isometric contraction, as shown in Figure 3, reveals a maximal value of force that plateau over a long period of time, at the beginning, middle or end of the plateau. When not taking into account such a shape, the RFD could be highly underestimated. That is the reason why we record the RFD up to 95% of the maximal force to avoid such a methodological inaccuracy.

Fmax reveals a lower CV (between 2.64% and 9.99%) than the others variables. This high reproducibility is highly dependent of the number of muscle fibres recruited and the final cross-section area. In our task, the advice was to hold as strong and as quick as possible. If the RFD was a good indicator of the ability to recruit quickly a high number of fibres, the maximal force is only dependent of the final number of fibres, independently of the time to recruit them. That is probably the explanation of this high reproducibility.

Concerning the averaged RFD, mean coefficients of variation decrease from 17.78% for averaged conditions in non-climbers to 12.40% in international climbers. This decreasing value of CV with skill level could be explained by the ability to reproduce a stable pattern of force over time is related to training status, including the ability to recruit motor units quickly with a high level of neural drive (Van Cutsem & Duchateau, 2005).

When focusing on RFD at different time scales, the RFD_{200ms} seems to be more reliable than other RFD conditions including maximal force, suggesting that these variables could be used to assess the level of force overtime in skilled climbers. In their study, Tillin et al. (2013) show that RFD_{200ms} is more stable than RFD_{50ms} (CV 14.6% for RFD_{50ms} vs. 7.9% for RFD_{200ms}). Our study reveals a decrease of mean CV from 15.15% (RFD_{50ms}) to 12.29% (RFD_{200ms}), which has been previously documented (Tillin & Folland, 2013). This high variability decreasing along the time course was recently found on isometric contractions of the leg extensor with CV decreasing from 48% at 50 ms to 23% at 150 ms (Folland et al., 2014). Such variability could be explained by the high difference in neural adaptation with training as documented by Van Van Cutsem & Duchateau (2005). For example, these authors described a four-time higher neural drive after specific training in explosive force. Moreover, this observation has a great impact especially when considering the functional importance of explosive force production in a wide variety of situations, such as to stabilise joints quickly to prevent falling or to maintain or adjust incorrect posture or balance. Indeed, postural regulation in a short time is a key moment in climbing and involves neural processes such as sensory feedback and reflex, and is a highly adaptive strategy in preventing falls.

The second goal of this study (ii) was to assess the difference among three skill levels (international, skilled and non-climbers) for maximal force and the rate of force development of finger flexors at different time scales. First of all, there is a significant difference between international climbers, skilled and non-climbers for the mass and the percentage of the body fat. The mass of the international climbers (64.8 ± 7.3 kg) in our study is slightly higher compared to other studies (Arazi, Rashidlamir, Abolhasani, & Hosaini, 2018; López-Rivera & González-Badillo, 2012; Medernach, Kelinöder, & Lötzerich, 2015). For instance, López-Rivera & González-Badillo, (2012) recorded an averaged weight of 68.95 ± 4.87 kg with similar height, revealing a difference of 6.02%. Moreover, the difference between international climbers and non-climber is important (20.39%). In fact, a low level of useless mass is not adapted with the locomotion in rock climbing, which is influenced by the mass of the climber for two main reasons: first, climbers have to fight against gravity, and second, climbing holds are getting smaller and smaller with skill level, which increases dramatically the importance of the relative force.

For absolute maximal force, all the conditions discriminate international from skilled and non-climbers, with a mean difference of 22.11% between international and skilled climbers and 38.58% between skilled and non-climbers. Such a difference has been shown in many studies with comparable values, revealing that maximal finger force is a key variable in climbing (Laffaye et al., 2015).

RFD_{50ms} showed no difference despite significant differences between groups. This could be explained by high intra-subject variability due to the high contribution of neural drive during this early phase of the force–time curve. Indeed, Tillin, Jimenez-Reyes, Pain, and Folland (2010) explain that within the first 50 ms, changes in RFD are driven by neural factors rather than changes in musculo-tendinous properties.

RFD_{100ms} reveals a difference of 11.61% between international and skilled, 37.11% between skilled and non-climbers, and 44.41% between international and non-climbers. This part of the curve during the isometric task is influenced by neural drive (Folland et al., 2014). Furthermore, differences were observed in RFD_{200ms} for all conditions: 24.51% between international and skilled, 34.04% between non-climbers and skilled, and 50.21% between international and non-climbers. Andersen & Aagaard (2006) explain that RFD between 150 and 250 ms is highly dependent on either the contractile properties of the muscle-tendon unit, such as cross-section area and neural drive, or a combination of both. Climbing probably changes the intrinsic musculo-tendinous stiffness, especially the finger flexor, and the contraction mechanism linked to neural drive (Andersen & Aagaard, 2006). An additional correlation between Fmax and RFD reveals an $r^2 = 0.61$ for RFD_{200ms}. Considering that the maximal force is linked with the muscle cross-section area (Cohen et al., 2015), this contribution of maximal force confirms a recent study that showed a comparable correlation between explosive force at a comparable time course (150 ms) and maximal voluntary contraction ($r^2 = 0.90$) (Folland et al., 2014). This confirms the crucial role of muscular properties in RFD (Andersen & Aagaard, 2006; Tillin et al., 2010). For $RFD_{95\%,}$ a 45.18% difference between international and skilled, and 57.05% difference between international and non-climbers has been observed, meaning that international climbers would be able to reach 95% of Fmax more quickly than the others. This two-times greater value found in international climbers compared to skilled climbers and non-climbers reveals their high level of adaptation in a wide variety of motions (fast and strong such as the 'dyno' movement or explosive movement, including postural or reflex adaptation and slower movements) compared to skilled climbers.

To conclude, RFD of the finger flexor in isometric contraction is a reliable and discriminating variable for climbing at 200 ms and at 95% of maximal force, and could be used in monitoring training. Subsequent investigation should delve deeper to explain the high variability in early RFD (50 ms and 100 ms).

Conclusion

The hypothesis of this study was to show the reliability between sessions and within-session for the test–retest, and to show the difference among three skill levels for finger flexor maximal force (Fmax) and rate of force development (RFD) at different time scales.

The results reveal a high reliability for international climbers for the RFD, especially for the RFD_{200ms}, suggesting that this variable could be used with a good accuracy for intra or inter subject comparison for training purpose. Moreover, this parameter is able to discriminate skill level, as shown by the difference recorded between international and skilled, and skilled and non-climbers. Considering the high constraints of time to hold quickly and strongly in rock climbing, this parameter seems to be a key factor for raising the high level of expertise. Theoretical background on rate of force development suggests that the value recorded at this time scale is the consequence of neural and muscular factor. This implies for trainer that (i) designing workout for climbers based on holding as quick and as strong as possible is a good way to increase their finger rate of force development and consequently their climbing efficiency, especially in movement, such as the dyno or dynamic movements;

(ii) recording the rate of force development at 200 ms is a good way to monitor a climber during training session, to assess the effect of a specific workout procedure on the way he produces the force or to compare values between different climbers.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

Aagaard, P., Simonsen, E. E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of Applied Physiology*, *93*, 1318–1326. doi:10.1152/japplphysiol.00283.2002

Amca, A. M., Vigouroux, L., Aritan, S., & Berton, E. (2012). Effect of hold depth and grip technique on maximal finger forces in rock climbing. *Journal of Sports Sciences*, *30*, 37–41. doi:10.1080/02640414.2012.658845

Andersen, L. L., & Aagaard, P. (2006). Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *European Journal of Applied Physiology*, *96*, 46–52. doi:10.1007/s00421-005-0070-z

Arazi, H., Rashidlamir, A., Abolhasani, M. Z., & Hosaini, S. A. (2018). Profiling and predicting performance of indoor rock climbers. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, *20*, 82–94. doi:10.5007/1980-0037.2018v20n1p82

Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, *26*, 217–238. doi:10.2165/00007256-199826040-00002

Cohen, C., Texier, D., Laffaye, G., Auvray, L., & Clanet, C. (2015). Weightlifting and the actomyosin cycle. *Proceedings of the Royal Society A*, *471*, 20150473. doi:10.1098/rspa.2015.0473

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: Lawrence Earlbaum Associates, pp. 20–26.

Fanchini, M., Violette, F., Impellizzeri, F. M., & Maffiuletti, N. A. (2013). Differences in climbing-specific strength between boulder and lead rock climbers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *27*, 310–314. doi:10.1519/JSC.0b013e3182577026

Folland, J. P., Buckthorpe, M. W., & Hannah, R. (2014). Human capacity for explosive force production: Neural and contractile determinants. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *24*, 894–906. doi:10.1111/j.1600-0838.2012.01523.x

Hochholzer, T., & Schöffl, V. (2012). *Climbing: Injury and trauma: Prevent it, heal it.France*. Grenoble: Glénat.

Laffaye, G., Collin, J. M., Levernier, G., & Padulo, J. (2014). Upper-limb power test in rock-climbing. *International Journal of Sports Medicine*, *35*, 670–675. doi:10.1055/s-0033-1358473

Laffaye, G., Levernier, G., & Collin, J.-M. (2015). Determinant factors in climbing ability: Influence of strength, anthropometry, and neuromuscular fatigue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *26*, 1151–1159. doi:10.1111/sms.12558

Levernier, G., & Laffaye, G. (2017). Four weeks of finger grip training increases the rate of force development and the maximal force in elite and world-top ranking climbers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, (09). doi :10.1519/JSC.0000000000002230

López-Rivera, E., & González-Badillo, J. J. (2012). The effects of two maximum grip strength training methods using the same effort duration and different edge depth on grip endurance in elite climbers. *Sports Technology*, *5*, 37–41. doi:10.1080/19346182.2012.716061

Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*, *116*, 1091–1116. doi:10.1007/s00421-016-3346-6

Magiera, A., Roczniok, R., Maszczyk, A., Czuba, M., Kantyka, J., & Kurek, P. (2013). The structure of performance of a sport rock climber. *Journal of Human Kinetics*, *36*, 107–117. doi:10.2478/hukin-2013-0011

Medernach, J. P., Kelinöder, H., & Lötzerich, H. H. (2015). Fingerboard in competitive bouldering: Training effects on grip strength and endurance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *29*, 2286–2295. doi:10.1519/JSC.0000000000000873

Michailov, M. L., Baláš, J., Tanev, S. K., Andonov, H. S., Kodejška, J., & Brown, L. (2018). Reliability and validity of finger strength and endurance measurements in rock climbing. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *89*, 246–254. doi:10.1080/02701367.2018.1441484

Schöffl, I., Einwag, F., Strecker, W., Hennig, F., & Schöffl, V. (2007). Impact of taping after finger flexor tendon pulley ruptures in rock climbers. *Journal of Applied Biomechanics*, *23*, 52–62. doi:10.1123/jab.23.1.52.

Tillin, N. A., & Folland, J. P. (2013). Identification of contraction onset during explosive contractions. Response to Thompson et al. "Consistency of rapid muscle force characteristics: Influence of muscle contraction onset detection methodology". *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, *23*, 991–994. doi:10.1016/j.jelekin.2013.04.015

Tillin, N. A., & Folland, J. P. (2014). Maximal and explosive strength training elicit distinct neuromuscular adaptations, specific to the training stimulus. *European Journal of Applied Physiology*, *114*, 365–374. doi:10.1007/s00421-014-2985-8

Tillin, N. A., Jimenez-Reyes, P., Pain, M. T. G., & Folland, J. P. (2010). Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *42*, 781–790. doi:10.1249/MSS.0b013e3181be9c7e

Tillin, N. A., Pain, M. T. G., & Folland, J. (2013). Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players. *Journal of Sports Sciences*, *31*, 66–76. doi:10.1080/02640414.2012.720704

Van Cutsem, M., & Duchateau, J. (2005). Preceding muscle activity influences motor unit discharge and rate of torque development during ballistic contractions in humans. *Journal of Physiology*, *562*, 635–644. doi:10.1113/jphysiol.2004.074567

White, D. J., & Olsen, P. D. (2010). Atime motion analysis of bouldering style competitive rock climbing. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *24*, 1356–1360. doi:10.1519/JSC.0b013e3181cf75bd

ANNEXE 4 : ARTICLE ACCEPTE, 2019

Levernier, G., P. Samozino, G. Laffaye 2019
Force-Velocity-Power profile in high elite boulder, lead, speed climbers competitors.
"*International Journal of Sports Physiology and Performance*".



International Journal of Sports Physiology and Performance

Decision Letter (IJSPP.2019-0437.R3)

From: daniel.boullosa@gmail.com

To: guillaume.levernier@u-psud.fr

CC:

Subject: International Journal of Sports Physiology and Performance - Decision on Manuscript ID IJSPP.2019-0437.R3

Body: 25-Oct-2019

Dear Mr. LEVERNIER,

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "Force-Velocity-Power profile in high elite boulder, lead, speed, climbers competitors" in its current form for publication in the International Journal of Sports Physiology and Performance. The comments of the reviewer(s) who reviewed your manuscript are included at the foot of this letter.

We anticipate that your paper will be published in print in approximately 8-10 months. The In Press and MedLine listings should be available approximately 4 weeks from now.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the International Journal of Sports Physiology and Performance, we look forward to your continued contributions to the Journal.

Yours sincerely,

Dr Daniel Boullosa
Associate Editor, International Journal of Sports Physiology and Performance
daniel.boullosa@gmail.com

Reviewer(s)' Comments to Author:

Date Sent: 25-Oct-2019

Force-Velocity-Power profile in high elite boulder, lead, speed climbers competitors

Guillaume Levernier[1, 2], Pierre Samozino[3] and Guillaume Laffaye[1, 2, 4]

1 - Complexity, innovations, motor and sport activities, University of Paris-Sud, University of Paris-Saclay, Orsay, France
2 - Complexity, innovations, motor and sport activities, University of Orleans, Orleans, France
3 - Univ Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, F-73000 Chambéry, France
4 - Research Center for Sports Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation.

Abstract

Purpose: The goal of this study was to compare the force production capacities between boulderers, lead climbers and speed climbers during a pull-up test using a force-velocity- power profile.
Methods: 24 high elite climbers (11 boulderers, 8 lead climbers, 5 speed climbers) participated in this study. They realized two pull-ups at different percentages of their body mass (0 %, 30 %, 45 %, 60 % and 70 %). Force-Velocity-Power profile analyses by accelerometer were performed to each load. The intraclass correlation (ICC) and coefficients of variation (CV) were calculated. A one-way analysis of variance was performed (ANOVA) with a Tukey Post-Hoc test to assess the difference between the groups.
Results: Regarding the force, the CV ranged from 1.00 % to 6.18 % and the ICC from 0.98 to 0.99; for the velocity, the CV ranged from 2.75 % to 6.62 % and the ICC 0.84 to 0.95. The linear regression slope showed the R^2 between 0.93 and 0.99, confirming the high quality of the linear relationship between the velocity and the external force produced during a pull-up. Boulderers presented significantly higher ($p<0.05$) maximal power (+22.30 % and +26.29 %), mean power for the pull-up at body-weight (+23.49 % and +25.35 %), theoretical maximal velocity at zero force (V0) (+23.92 % and +21.53 %) compared to lead and speed climbers respectively, and slope of the curve (Sfv) (+35.21 % compared to lead climbers).
Conclusions: The reliability of the method was shown to be high. Moreover, boulderers were able to develop an important external force and were able to maintain high speed when the force production increased.

Key words: maximal power output, physical performance, training and testing, upper limbs, pull-up

Introduction

The ability to produce external force during dynamic contraction and the time taken to develop maximum force both appear to be discriminant factors in many sport activities[1,2,3]. This demonstrates the importance of movement velocity. This force production can be realized at different velocities, resulting in different power outputs since power is the product of force and velocity[4]. The power output is determinant in many activities such as jumping, cycling, sprinting[5], etc. When the production of force increases (with loading for example), the velocity decreases. Two different athletes are able to output the same power through two different ways; a high force with a small velocity or a high velocity with a small amount of force.

The mechanical capabilities of the neuromuscular system are described by linear force velocity (F-V) during dynamic contractions[6,7]. This relationship describes the changes in external force generation and power output with increasing movement velocity and could be resumed through typical variables such as the theoretical maximal force at null velocity (F0); the maximal power output (Pmax); and the theoretical maximal velocity at which the limb can extend during one extension / flexion under zero load (V0). The ratio between F0 and V0 (i.e., the slope of the linear F–V relationship) characterizes the F-V profile.

Different and simple methods to calculate the relation between force and velocity have been tested and verified for different movements such as vertical squat jumps[8], countermovement jumps[9] and bench presses[10]. These studies have mostly been interested in the lower limb movement (squat jump, countermovement jump) and the bench press for the upper limbs only. To our knowledge, only one study has used a pull-up movement[11] to demonstrate the force and power velocity relationship with different loads (between 70% and 100% of the 1RM). The results suggested an excellent individual relationship in load velocity (R^2 = 0.96 ± 0.02), force velocity (R^2=0.95±0.04) and power velocity (R^2=0.97±0.04). However, no study has experimented the F – V profile on climbers while the pull up were used to discriminate the level[2,12] in rock climbing. These parameters seem to be key factors in the climbing performance. Indeed, this sport required a high level of strength[13] and power[18]. Climbing is a combination of static motions that required a high level of isometric strength and of dynamic motion[14] that requires explosiveness.

Another study demonstrated that elite climbers were able to realize more pull-ups than skilled climbers[13]. However, Sport Climbing competitions are performed into 3 subdisciplines: bouldering, lead and speed climbing; of which the Force-Velocity-Power profile of its athletes is not yet known. In bouldering, the climber did not use a rope or harness and realized a succession of short, complex, dynamic movements[14] on a climbing structure which did not exceed a height of 5 m. The lead climbing was characterized by a succession of movements on a climbing structure between a height of 9 and 15meters. The climber used a rope and draws to avoid falling. This activity required many qualities such as strength but also upper limb endurance[15,16]. Finally, in the speed climbing, the wall and the holds were identical. The goal in this situation was to climb as quickly as possible. On a 15-meter high wall, the men's world record is 5.47seconds and the women's world record is 7.10seconds. Many factors such as the finger flexor strength and endurance[2,17] and the upper limb power[18],[19] were different in these three subdisciplines. In addition, there were differences in each discipline, not only in the upper limb force, especially in the fingers[20] but also the velocity of the ballistic pull-up[18]. The authors of the study demonstrated that boulderers were able to realize explosive pull-ups faster than lead climbers[18] (1.81±0.28m.s^{-1} versus 1.63±0.59m.s^{-1}), but no difference was found for the final distance reach. Therefore, each discipline would appear to generate specific adaptations among climbers.

During the 2020 Summer Olympic Games, sport climbing will be present through a combination of the 3 disciplines. While many studies have shown differences between bouldering and lead climbing[20], few of them have shown any interest in the differences

in the physical qualities of these three disciplines. Moreover, to date, no study has dealt with differences in the three disciplines in the upper-limb dynamic force production capacity using a force-velocity-power profile.

The aim of this study was to compare the upper-limb force production capacity between boulderers, lead and speed climbers. The force production capacities were assessed through force-velocity-power relationships during loaded pull-up movements, by means of an original and previously-tested method.

Method

Subjects

Twenty-four high elite male climbers participated in this study. The participants were divided into three groups: 11 boulderers (age = 26.3 ± 4.7 years), 8 lead climbers (age = 22.6 ± 5.5years) and 5 speed climbers (age = 24.2 ± 5.5years).

All of the climbers included in this study had participated in international competitions (World Cup, European Cup and World Championship) during the previous season in their respective disciplines and trained 6 times per week. The boulderers had a level higher than 8b in bouldering on the Fontainebleau rating scale (Fb), a grade of 5.13d using the Yosemite Decimal System (YDS) and a grade of 28 using the International Rock Climbing Research Association rating scale (IRCRA)[21]. The lead climbers had a level higher than 8c in lead climbing, a grade of 5.14b on the YDS scale and a grade of 27 on the IRCRA scale. The speed climbers were able to realize the official wall (15 meters high with a 5° overhang angle) in 6.28 ± 0.81 seconds (best records in the World Cup competition during the season of 2017-2018). None of the climbers had suffered any injuries to the fingers or upper limbs during the previous ten months. They all signed a consent statement which explained the test conditions and the risks involved. This research protocol was approved by the ethical committee of the University of Paris-Sud and was conducted according to the principles of the Declaration of Helsinki on human research. All experiment was realized in the same place.

Design

For this study, all of the participants performed the trials at the same time of day (10am) to eliminate any circadian variation influence. A same 40mm pull-up bar was used. The climbers were instructed to restrain any caffeine or alcohol consumption in the 12 hours before the test, but they were able to drink water. All anthropometric data such as the height (cm), the body mass (kg), the body fat percentage (% of body mass), the arm span (cm), the APE index (ratio between arm span and height) and the biacromial breadth (cm) were recorded before the session.

Each participant performed the same 20 minute warm-up exercise prior to the test; climbing on the same structure, starting at low intensity and ending with high-intensity movements. To finish, they realized 3 pull-ups with different loads (10%, 20% and 40%), with 3 minute rest between each pull-up.

Concerning the position, the climber took the pull-up bar with his hands in pronation, at a distance of 1.5 times his biacromial breadth (see figure 1).

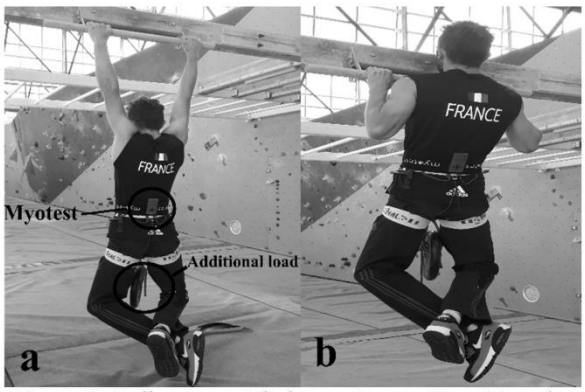


Figure 1: Pull-up test with the starting position (a) and the finishing position (b).

The feet did not touch the ground and the shoulders remained inactive before the signal. The participants were asked to realize a vertical pull-up as quickly as possible. The pull-up was successful only if the chin exceeded the pull-up bar. This position was maintained for 1second after which the participants were asked to

re-straighten their arms. If these requirements were not met, the trial was repeated.

For the experiment, each climber realized two pull-ups at different body mass percentages (0%, 30%, 45%, 60% and 70%) for a total of 10 pull-ups, with 3 minute rest between each pull-up to limit the effect of fatigue. The different loading conditions were performed in random order.

Methodology

The weight, body fat percentage and body mass index (BMI) were recorded with a 'TANITA BC 545n InnerScan' diagnostic scale (TANITA, Amsterdam, The Netherlands). All anthropometric data are presented in Table 1. The only significant difference observed between the groups was for the body mass; $F(2.21) = 3.99$, $p = 0.034$ with $\eta^2 = 0.28$ and $\beta = 0.65$. The Tukey Post-Hoc test revealed a significantly higher body mass for speed climbers compared to lead climbers (+10.03%). These values were close to other studies concerning elite and international climbers[27,28,29].

A tridimensional accelerometric system (Myotest, Sion, Switzerland, sample rate = 500Hz) was fixed onto a belt above the climbing harness in the lumbar area. During the pull-up, the climbers were asked not to perform any movement along the sagittal plane, which was checked by the experimenter in two steps. First, a visual control of the experimenter checked that the body motion raised into the sagittal plane. Then, the data from the three planes allowed to check the validity of the motion. The center of mass kinematics were approximated. Only the ascendant part of the pull-up was recorded for further analysis. The beginning of the motion was determined when the vertical acceleration exceeded $0.10 m.s^{-2}$. The end of the movement was characterized when the velocity was at $0 m.s^{-1}$; the climbers had finished the pull-up and were stationary.

The accelerometric data were stored during the assessments and subsequently transferred to the software (Myotest ProSoftware, version 1.3.2). We chose to use the raw signal, without filtering. The instantaneous vertical velocity (V) of the center of mass was obtained by the software after integration over time of the acceleration with an initial velocity of $0 m.s^{-1}$. The acceleration was used at each instant to calculate the force $F=m*a$ (in $N.kg^{-1}$); m=the body mass of the climber with an additional load. The instantaneous power was the product of the force and velocity at each instant with $P=F*V$ (in $W.kg^{-1}$). The mean force, velocity and power of each trial were all calculated as averages of instantaneous force, velocity and power respectively during the ascendant part of the pull-up.

The F–V relationships were determined by least-squares linear regression using the trial with the highest mean velocity with each load condition[4,22]. The F–V curves were extrapolated to obtain the F0 (in $N.kg^{-1}$) and the V0 (in $m.s^{-1}$), which correspond respectively to the intercepts of the F–V curve with the force and velocity axis. The F–v profile was computed as the slope of the F–V linear relationship (Sfv, in $N.s.kg^{-1}.m^{-1}$). The Pmax values (in W or $W.kg^{-1}$) were determined as $Pmax = F0* V0/4$[4]. The Pmax was compared against the power (P) recorded during the pull-up performed without additional load. This allows to evaluate if the climbers were able to develop the maximal power output at their own body mass.

	Body mass (kg)	% of body fat (%)	Height (cm)	Arm spam (cm)	APE index	bi acromial breath (cm)
Bouldering	64.85 ± 3.00	7.43 ± 1.89	174.91 ± 4.23	180.50 ± 5.62	1.03 ± 0.02	33.11 ± 1.25
Lead	62.03 ± 3.96§	7.95 ± 2.39	174.00 ± 5.71	177.98 ± 8.23	1.02 ± 0.01	31.99 ± 1.87
Speed	68.94 ± 6.86	9.42 ± 1.82	177.60 ± 5.18	182.80 ± 4.40	1.03 ± 0.02	33.00 ± 2.37

§ When statistical difference with speed climbing ($p<0.05$)

Table 1: Anthropometric characteristics of the three samples.

Statistical Analysis

All data are presented as mean ± SD. The normality and homogeneity of the variance were checked before analysis with the aid of the Shapiro-Wilk and the Brown-Forsythe test respectively. The statistical tests were processed with the use of the software STATISTICA (version 10, StatSoft, Inc., Tulsa, USA).

In order to assess the reliability of F and V, the intraclass correlation (ICC) and the typical error of measurement (CV, expressed in %) were calculated between the two trials in each condition on the mean F and V quantified during pull-up. About measurements reliability, Atkinson and Nevill (1998)[23] showed an ICC>0.8 and a CV<10% guarantee excellent reliability.

To assess the difference between the three groups, a one-way analysis of variance was performed (ANOVA) with the aid of a Tukey Post-Hoc test. The significance was set at $p<0.05$ and the effect size (Π^2) was defined as small for $\eta^2>0.01$, medium for $\eta^2>0.09$, and large for $\eta^2>0.25$[24]. For each result, the power observed (β) was calculated.

Results

The signal variations for the loads of 0%, 45% and 70% are presented in Figure 2.

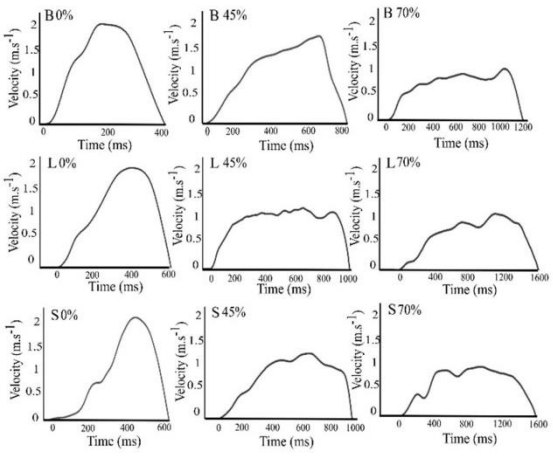


Figure 2: Graphical representation of the typical velocity signal for boulderers (B), lead climbers (L) and speed climbers (S) at loadings of 0%, 45% et 70%.

We observed that the ascendant part time increased with the load. Moreover, the signals were different between the three groups, especially for the start of the pull-up. For boulderers and lead climbers at 0% loading, the velocity seemed to increase in an almost linear manner until the maximal instantaneous speed, whereas for the speed, a phase was observed at the beginning in which the velocity decreased.

The typical signals of F and V during a pull-up movement are presented in Figure 3.

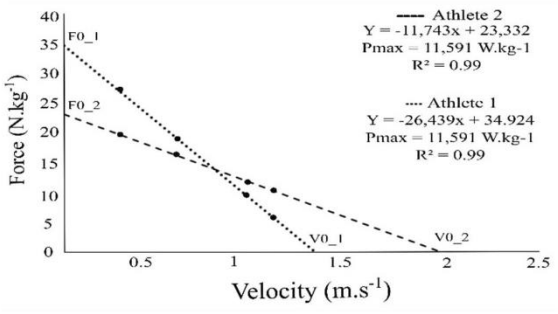


Figure 3: Typical F-V relationship of two athletes (1 and 2). Athlete 1 presented a higher F0 but a lower V0 compared to athlete 2 for the same Pmax.

Concerning the reliability, the ICC and CV values for the mean force and the mean velocity are presented in Table 1. The force ranged from 9.92±0.79N.kg^{-1} to 17.38±2.22N.kg^{-1}; the CV from 1.00% to 6.18% and the ICC from 0.98 to 0.99. The velocity ranged from 0.38±0.12m.s^{-1} to 0.93±0.109m.s^{-1}; the CV from 2.75% to 6.62% and the ICC from 0.84 to 0.95.

	Mean velocity (m.s^{-1})			Force (N.Kg^{-1})		
Lifted mass (%)	Mean values	ICC	CV (%)	Mean values	ICC	CV (%)
0	0.93 ± 0.19	0.88	6.62	9.92 ± 0.79	0.99	1.82
30	0.69 ± 0.11	0.86	3.49	12.94 ± 1.11	0.99	1.00
45	0.56 ± 0.14	0.84	5.37	14.39 ± 1.18	0.99	6.18
60	0.46 ± 0.15	0.94	2.91	15.78 ± 1.26	0.99	4.59
75	0.38 ± 0.12	0.95	2.75	17.38 ± 2.22	0.99	1.30

Table 2: Mean intraclass correlation (ICC) and coefficient of variation (CV) for the mean velocity and the mean force function of the lifted mass (0%, 30%, 45%, 60% and 75%).

	F	p	η^2	β	Boulderers	Lead climbers	Speed climbers
Slope	F(2, 21) = 4.50	0.024*	0.30	0.71	-10.48±2.24§	-14.17±3.49	-12.27±1.73
V0 (m.s-1)	F(2, 21) = 7.82	0.003*	0.43	0.92	2.09±0.36§ α	1.59±0.24	1.64±0.24
F0 (N.kg-1)	F(2, 21) = 0.06	0.94	0.01	0.06	21.23±1.87	21.81±2.67	19.81±1.31
Pmax(W.kg-1)	F(2, 21) =10.64	0.001*	0.50	0.98	11.03±1.56§ α	8.57±1.09	8.13±1.48
P (W.kg-1)	F(2,21) = 11.89	0.001*	0.53	0.99	10.73±1.43§ α	8.21±1.00	8.01±1.43

* When statistical difference ($p < 0.05$)
§ When statistical difference with lead climbers ($p < 0.05$)
α When statistical difference with speed climbers ($p < 0.05$)

Table 3: Mean ± SD of the force velocity results of the three groups.

The individual F-V relationships were consistent with the linear regressions (R^2 between 0.93 and 0.99) with a mean value of 0.98±0.02 for the boulderers, 0.95±0.02 for the lead climbers and 0.98±0.01 for the speed climbers.

The force production capacity variables are presented for the three groups in Table 3.

The Tukey Post-Hoc test revealed a significant difference between the boulderers and lead climbers for the Pmax ($p<0.01$), Sfv ($p<0.05$), V0 ($p<0.01$), P ($p<0.01$) and between the boulderers and speed climbers for the Pmax ($p<0.05$), V0 ($p=0.01$) and P ($p<0.01$).

A mean difference of 2.80±0.24% between the Pmax and the mean P for the three groups was recorded (2.72±0.21% for boulderers, 4.20±0.25% for lead climbers and 1.48±0.09% for speed climbers).

Discussion

The main objective of this study was to analyze the difference in force production capacities between the three groups using of the force-velocity-power relationship for a pull-up movement. This relationship proved to be linear with good reliability. Moreover, a significant difference appeared between the three groups, revealing a higher velocity contribution and a more important Pmax for bouldering compared to the other disciplines.

Concerning the test reliability, the ICC mean was 0.89 for the mean velocity and 0.99 for force. The CV mean was 4.23% for the mean velocity and 2.98% for force. These results are in line with previous studies using accelerometers which showed a CV of 4.2% for force and 8.2% for a squat jump test velocity[8]. Atkinson and Nevill (1998)[23] showed an ICC>0.8 and a CV<10% guarantee excellent reliability. The method used here to test force production capacity during pull-up exercises was highly reliable. The linear regression slope showed the R^2 to be between 0.93 and 0.99. This result was similar to previous studies on both lower limb[25,26] and upper limb[11] and confirmed the high quality of the linear relationship between the velocity and the external force produced during a pull-up. This results suggested a good reproducibility of the F–V relationship, even if it is also influenced by the range covered by the different conditions. This should be tested in future studies.

Concerning the Pmax, there was a significant difference between bouldering and the other two disciplines (11.03±1.56W.kg^{-1} versus 8.57±1.09W.kg^{-1} and 8.13±1.48W.kg^{-1}) with a higher power capacity for boulderers compared to lead and speed climbers. The boulderers were able to produce higher maximal power due to a higher capacity to produce force at high velocities than the other climbers. Indeed, the boulderers presented significantly higher V0 values than the other groups (2.09±0.36m.s^{-1} versus 1.59±0.24m.s^{-1} and 1.64±0.24m.s^{-1}), revealing many boulderer profile indicators. While the lead climbers needed maximal strength and also finger and arm endurance[12,17], the bouldering was characterized by

many dynamic movements[14] and revealed an explosive profile. In fact, many dynamic movements characterized this discipline at very high intensity. Nevertheless, there is also a significant difference between the boulderers and the speed climbers. Two reasons could explain this difference. First, the speed climbing velocity has been linked to the lower limbs[19]. This test focused on the upper limbs only and may have underestimated the speed climber velocity contribution. Second, all climbers began with their arms completely stretched out. They then realized the pull-up as quickly as possible. Two phases of the pull-up could be identified: first the descent of the scapula with a little flexion of the arm and second, the total flexion of the arm. However, in speed climbing, the climbers never realized any movement with no velocity with their arms stretched out (except at the beginning), to limit the range of motion and maintain velocity. In the bouldering and lead climbing, many movements needed to begin with the arms stretched out in order to maximize the motion range. The climbers began their movements with no speed and needed a very fast force production with a large amplitude. These two reasons may explain the difference between the performances of the boulderer and the speed climber. The capacity to produce rapid movement in the upper limbs seems to be specific to boulder climbing.

For the F0, no difference between the lead and speed climbers and boulderers (between 19.81±1.31N.kg^{-1} and 21.23±1.87N.kg^{-1}) was observed. These values were higher than the other study mentioned earlier which used the force velocity profile in pull-ups (between 14.8±2.1N.kg^{-1} and 19.0±2.6N.kg^{-1})[11]. This difference could be explained by the athlete expertise. In fact, this study relates to elite climbers who have been training for many years. The results demonstrate that a high level of force seems necessary to be an high elite climber, as previously emphasized[18]. A ballistic test with explosive pull-ups and no load[18] was realized on elite, skilled and novice climbers. Although there was a significant difference between each group, no difference between the elite boulderers and the elite lead climbers was observed. A high level of force seemed required but there were no discriminant factors between the elite lead climbers, speed climbers and boulderers[18]. Moreover, the force-velocity profile is a ratio between force production capacities at low and high velocities, and is characterized by the slope of the curve (Sfv)[4,25]. There was a significant difference between the boulderers and lead climbers (-10.48±2.24 versus -14.17±3.49) with a weaker slope value for boulderers compared to lead climbers. If the slope dropped quickly, the force production capacities decreased quickly when the movement velocity increased. Consequently, the boulderers had a higher force-velocity profile (less negative) which was focused toward speed qualities (i.e. force production at high velocity).

These force-velocity-power profile differences induced a higher power production during a pull-up at body weight with a significant difference between the boulderers and the lead and speed climbers. Moreover, a mean difference of 2.80% between the Pmax and the mean P was recorded for the three groups. Therefore, we could conclude that the power developed at body weight was almost similar to the Pmax, which indicates that the upper-limb force-velocity profile of these athletes is quite optimal since it allows them to develop their maximal power while competing when they mobilize their own body mass.

Nevertheless, this study presented some limits. Since, they were able to drink water before the test may have a slight impact on the bio impedance analyses. The Myotest was fixed onto a belt in the lumbar area. During the pull-up movement, the upper-limb flexion induced a slight downward movement of the center of mass whereas the Myotest did not move. Therefore, the acceleration and velocity may be slightly overestimated. However, the induced errors were negligible (as shown for the vertical jump in which the same phenomenon occurs for the lower limbs which are heavier than the upper limbs[7]), and therefore did not impact the results of this study nor, in particular, the comparison between the three groups. The use of the Myotest accelerometer for this kind of test has already been shown to be valid and reproducible[8] but that this

would require in-depth studies to check if placement in the lumbar area does not affect this precision.

Second, the participants in the speed climbing group were few, as this practice is relatively recent, and the official wall only appeared in 2007; therefore the number of participants in France was lower than that of the lead climbing and bouldering. However, if the number of participants had been larger, it would have been necessary to reduce the level of expertise. It would not have been possible to compare the three groups. A greater sample size for each group would allow a better characterization of every modality, and detected significant differences in some parameters increasing the statistical power. Finally, the reliability of the F-V relationship was not assessed and could be analyzed in furthers studies.

Practical application

This is the first study which uses the force-velocity-power relationship to test the force production capacity of the world's top ranking climbers. The purpose of this study was to compare the difference and similarity between boulderers, lead and speed climbers in a pull-up test. As part of a combined Olympic format, it seems that the best specialty combines not only a high level of strength[12,18] and endurance[2] but also significant power, such as the large dynamic movement in bouldering[14]. A "velocity" profile with the ability to produce an important force at high velocity seems to be the most appropriate discipline for the combined format. Therefore, it seems that bouldering is the most favorable to perform at the 2020 Olympic Games which will take place in Japan. Further studies would be needed to see how optimizing this F-V profile, according to specific training, would be possible[30].

Conclusions

High elite climber force production capacity was assessed during pull-up movements with the use of the force-velocity-power profile. The method reliability was shown to be high.

In addition, there were many significant differences between boulderers and lead climbers (Pmax, Sfv, V0, P), and between boulderers and speed climbers (Pmax, V0, P) revealing many boulder-climber profile indications. Compared to the speed and lead climbers, the boulderers were able to develop an important external force and maintain it at a high velocity. Their power and velocity qualities were determinant in their discipline and maybe allowed a better adaptation to the other climbing disciplines; combined competition in particular.

Acknowledgments

The authors would like to thank the French Federation of Mountaineering and Climbing as well as the coaches of the National Climbing Federation for their collaboration and their accessibility. The authors would also like to thank the French boulder, difficulty and speed climbing team for their participation in this study. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References

1. Cormie P, Mccaulley GO, Triplett NT, Mcbride JM. Optimal Loading for Maximal Power Output during Lower-Body Resistance Exercises. Phys Fit Perform. 2007;39(2):340-349.

2. Laffaye G, Levernier G, Collin JM. Determinant factors in climbing ability: Influence of strength, anthropometry, and neuromuscular fatigue. Scand J Med Sci Sport. 2015;26(10):1151-1159.

3. Frost DM, Bronson S, Cronin JB, Newton RU. Change in maximal strength, velocity, and power after 8 weeks of training with pneumatic of free weight resistance. J strength Cond Res. 2016;30(4):934-944.

4. Samozino P, Rejc E, Di Prampero PE, Belli A, Morin JB. Optimal force-velocity profile in ballistic movements-Altius: Citius or Fortius? Med Sci Sports Exerc. 2012;44(2):313-322.

5. Cross MR, Brughelli M, Samozino P, Brown SR,

Morin J. Optimal Loading for Maximizing Power During Sled-Resisted Sprinting. Int J Sports Physiol Perform. 2017;12:1069-1077.

6. Samozino P, Horvais N, Hintzy F. Why does power output decrease at high pedaling rates during sprint cycling ? Med Sci Sports Exerc. 2007;39(4):680-687.

7. Samozino P, Morin JB, Hintzy F, Belli A. A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. J Biomech. 2008;41(14):2940-2945.

8. Giroux C, Rabita G, Chollet D, Guilhem G. What is the Best Method for Assessing Lower Limb Force-Velocity Relationship ? Int J Sports Med.

9. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Pareja-Blanco F, et al. Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump. Int J Sports Physiol Perform. 2017;12(1):36-43.

10. Rahmani A, Samozino P, Morin JB, Morel B. A simple method for assessing upper-limb force–velocity profile in bench press. Int J Sports Physiol Perform. 2018;13(2):200-207.

11. Muñoz-López M, Marchante D, Cano-Ruiz MA, Chicharro JL, Balsalobre-Fernández C. Load, force and power-velocity relationships in the prone pull-up exercise. Int J Sports Physiol Perform. 2017;12(9):1249-1255.

12. Ozimek M, Rokowski R, Draga P, et al. The role of physique, strength and endurance in the achievements of elite climbers. PLoS One. 2017;12(8):1-11.

13. Ozimek M, Staszkiewicz R, Rokowski R, Stanula A. Analysis of Tests Evaluating Sport Climbers' Strength and Isometric Endurance. J Hum Kinet. 2016;53:249-260.

14. White DJ, Olsen PD. a Time Motion Analysis of Bouldering Style Competitive Rock Climbing. J strength Cond Res. 2010;25(5):1356-1360.

15. Billat V, Palleja P, Charlaix T, Rizzardo P, Janel N. Energy specificity of rock climbing and aerobic capacity in competitive sport rock climbers. J Sports Med Phys Fitness. 1995;35(1):20-24.

16. Bertuzzi R, Fanchini E, Tricoli V, et al. Fit-climbing test: a field test for indoor rock climbing. J Strength Cond Res. 2012;26(6):1558-1563.

17. Macleod D, Sutherland DL, Buntin L, et al. Physiological determinants of climbing-specific finger endurance and sport rock climbing performance. J Sports Sci. 2007;25(12):1433-1443.

18. Laffaye G, Collin JM, Levernier G, Padulo J. Upper-limb power test in rock-climbing. Int J Sports Med. 2014;35(8):670-675.

19. Ryepko O.A. Features and functionality of speed and power capabilities of elite climbers and various types of rock climbing. Phys Educ students. 2013;6:60-65.

20. Maurizio F, Violette F, Impellizzeri FM, Maffiuletti N a. Differences in Climbing-Specific Strength Between Boulder and Lead Rock Climbers. J Strength Cond Res. 2013;27(2):310-314.

21. Draper N, Giles D, Schöffl V, et al. Comparative grading scales, statistical analyses, climber descriptors and ability grouping: International Rock Climbing Research Association position statement. Sport Technol. 2015;8(3-4):88-94.

22. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Cuadrado-Peñafiel V, Conceição F, González-Badillo JJ, Morin JB. Effect of countermovement on power–force–velocity profile. Eur J Appl Physiol. 2014;114(11):2281-2288.

23. Atkinson G, Nevill A. Statistical Methods for Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine. Sport Med. 1998;26(4):217-238.

24. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences Lawrence Earlbaum Associates. Hillsdale, NY. 1988:20-26.

25. Samozino P, Edouard P, Sangnier S, Brughelli M,

Gimenez P, Morin JB. Force-velocity profile: Imbalance determination and effect on lower limb ballistic performance. Int J Sports Med. 2014;35(6):505-510.

26. Samozino P, Morin JB, Hintzy F, Belli A. A simple method for measuring force , velocity and power output during squat jump. J Biomech. 2008;41:2940-2945.

27. Levernier G, Laffaye G. Four weeks of finger grip training increases the rate of force development and the maximal force in elite and top world-ranking climbers. J Strength Cond Res. 2017;00(00):1-10.

28. López-Rivera E, González-Badillo JJ. The effects of two maximum grip strength training methods using the same effort duration and different edge depth on grip endurance in elite climbers. Sport Technol. 2012;5(3-4):37-41.

29. Ryepko O.A. Morphological characteristics of elite athletes, specializing in speed climbing, climbing and alpinism. Med Biol Eng Comput. 2013:67-71.

30. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Brughelli M, Morin JB. Effectiveness of an individualized training based on force-velocity profiling during jumping. Front Physiol. 2017;7:677.