

H.E.P.H.O.

Haute Ecole Provinciale du Hainaut Occidental

Département paramédical

Section de kinésithérapie

73 rue Paul Pastur

7500 Tournai

**EVALUATION ISOCINETIQUE DES MUSCLES DU
POIGNET : INFLUENCE DE LA PRATIQUE DE
L'ESCALADE**

Promoteur : **P.Remy** (professeur à la HEPHO, kinésithérapeute à l'ULB – Hôpital Erasme, Bruxelles, Belgique)

Coordinateur : **P.Douillez** (kinésithérapeute au RHMS, clinique Louis Caty, Baudour, Belgique)

DRUMEL

FRANCOIS

Mémoire réalisé en vue d'obtenir le titre de licencié en kinésithérapie.

Année académique 2003-2004

Remerciements

Remy pascal, kinésithérapeute à l'ULB – Hôpital Erasme, Bruxelles, Belgique

Douillez Pascal, kinésithérapeute au RHMS clinique Louis Caty, Baudour

Honore P., chef du service de kinésithérapie au RHMS Louis Caty, Baudour.

François P., professeur à la HEPHO pour son aide et ses conseils en matière de statistique.

Hardy Delphine, Govart Clothilde, et Romedenne Laurent pour le prêt de leur matériel informatique et leur soutien.

Aux différentes personnes ayant accepté de participer aux tests indispensables à la réalisation de cette étude.

A ma famille

SOMMAIRE

PARTIE THEORIQUE

PARTIE THEORIQUE	3
I. ETUDE DU POIGNET	9
1 Anatomie du complexe	9
1.1 Eléments osseux	9
1.2 Eléments capsulo-ligamentaires	10
1.2.1 La capsule articulaire	10
1.2.2 Le ligament triangulaire	11
1.2.3 Le ligament antérieur	11
1.2.4 Le ligament postérieur	11
1.2.5 Le ligament latéral externe ou ligament collatéral radial	11
1.2.6 Le ligament latéral interne ou ligament collatéral ulnaire	12
1.3 Eléments musculaires	13
1.4 Eléments nerveux	14
1.5 Eléments vasculaires	15
2 Biomécanique du complexe articulaire du poignet	15
2.1 La dynamique du carpe	17
2.2 Axes de mouvement et centres de rotation	18
2.3 Amplitudes de mouvements	19
2.4 Actions musculaires	19
2.5 Interactions entre mouvements du poignet et de la main	21
II. LA METHODE ISOCINETIQUE	23
1 Historique	23
2 Définition - Principes - Description	24
2.1 Définition	24
2.2 Principes	24
2.2.1 La maîtrise de la vitesse	24
2.2.2 L'asservissement de la résistance	24
2.3 Description	24
2.3.1 Le dynamomètre	25
2.3.2 Les accessoires	26
2.3.3 Le logiciel	27
3 Les paramètres mesurés	28
3.1 Le peak torque (PT)	28
3.2 Le travail maximum (W)	28
3.3 Le peak torque relatif (PT/BW)	28
3.4 La puissance (P)	28
3.5 L'angle d'efficacité maximale (AEM)	28
3.6 Le rapport agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	28
3.7 La comparaison bilatérale pourcentuelle	29
3.8 L'amplitude de mouvement parcourue (ROM)	29
3.9 Les coefficients de variation (CV)	29
4 Biomécanique spécifique de l'isocinétisme	29

4.1	Les modes	29
4.1.1	Le mode concentrique	29
4.1.2	Le mode excentrique	29
4.1.3	Le mode isométrique	30
4.1.4	Le mode passif.....	30
4.2	La relation force – vitesse.....	30
4.3	Le rapport excentrique – concentrique	31
5	Reproductibilité des mesures de l'appareil.....	31
6	Isocinétisme et poignet	31
III. PRESENTATION DU SPORT ET DE LA POPULATION ETUDIEE.....		33
1	Types de pratique.....	33
1.1	L'escalade en extérieur.....	33
1.2	L'escalade en salle ou sur mur	33
2	Disciplines	34
2.1	La difficulté	34
2.2	Le bloc	34
2.3	La vitesse	34
3	Les critères de réussite.....	35
4	Les modes de réussite	35
4.1	Le « à vue »	35
4.2	Le « flash »	35
4.3	Le « après travail »	35
5	Les niveaux.....	35
6	Aspect physiologique et métabolique de l'effort.....	36
7	Les types de préhension.....	37
7.1	La prise en arquée.....	37
7.2	La prise en main ouverte ou « en crochet ».....	38
7.3	La prise en poche.....	38
7.4	La prise tendue	38
7.6	Les fissures	39
7.7	Les trous... ..	39
8	Biomécanique et biodynamique spécifiques à l'escalade.....	40
9	Traumatologie spécifique	42
9.1	Les lésions tendineuses.....	46
9.2	Les lésions de poulies	47
9.3	Les lésions ligamentaires, articulaires et osseuses	50
9.4	Autres lésions musculaires	51
9.5	Les atteintes nerveuses	51

PARTIE EXPERIMENTALE

I.	CHOIX DES POPULATIONS ETUDIEES	53
1	Caractéristiques des deux populations.....	53
1.1	Groupe contrôle (GC)	53
1.2	Groupe expérimental (GE)	53
II.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	54
1	Succession des évènements	54
2	Echauffement.....	54
3	Epreuve isocinétique.....	55
3.1	Matériel employé – Utilisation.....	55
3.2	Protocole expérimental de l'épreuve isocinétique.....	55
3.2.1	Test concentrique AGO/ANTAG - CON/CON.....	56
3.2.2	Test excentrique AGO/ANTAG - ECC/ECC.....	56
3.2.3	Test isométrique AGO/ANTAG –ISOM/ISOM	56
3.3	Choix des vitesses.....	57
3.4	Précautions visant à augmenter la reproductibilité des mesures	57
3.5	Choix des paramètres interprétés.....	58
3.5.1	Le peak torque (PT)	58
3.5.2	Le peak torque relatif (PT/BW).....	58
3.5.4	Le rapport agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	58
3.5.5	La comparaison bilatérale.....	58
4	Test de force de préhension de la main (ou GS, <i>grip strength</i>).....	59
4.1	Matériel utilisé.....	59
4.2	Protocole.....	60
4.3	Justification des choix ayant mené à ce protocole.....	60
4.3.2	Instructions	61
4.3.3	Nombre de répétitions	61
4.3.4	Position du dynamomètre	62
4.3.5	Conditions de validité du test	62
5	Réponses aux questionnaires distribués	63
III.	RECUEIL ET ANALYSE DES DONNEES	64
1	Recueil et analyse des données isocinétiques.....	64
1.1	Comparaisons des valeurs d'un même paramètre pour les deux groupes musculaires..	64
1.2	Comparaisons au sein d'un même échantillon	65
1.2.1	Comparaisons entre les deux côtés D et ND pour un même paramètre	65
1.2.1.1	Peak torque (PT).....	65
1.2.1.2	Peak torque relatif (PT/BW).....	65
1.2.1.3	Travail total (W)	66
1.2.1.4	Coefficient de variation (CV).....	66
1.2.1.5	Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	66
1.2.2	Comparaisons d'un même côté et d'un même groupe musculaire dans différents modes de contraction.....	66
1.2.2.1	Peak torque (PT).....	66
1.2.2.2	Peak torque relatif (PT/BW).....	67
1.2.2.3	Travail total (W)	67
1.2.2.4	Coefficient de variation (CV).....	68

1.2.2.5	Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	68
1.3	Comparaisons entre les deux échantillons.....	68
1.3.1	Peak torque (PT).....	68
1.3.2	Peak torque relatif (PT/BW).....	69
1.3.3	Travail total (W)	69
1.3.4	Coefficient de variation (CV)	69
1.3.5	Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	69
2	Recueil et analyse des données de force de préhension globale de la main (GS).....	69
3	Réponses aux questionnaires	72
3.1	Réponses concernant les tests isocinétiques et de GS	72
3.2	Caractéristiques physiques des deux échantillons	73
3.3	Calcul des niveaux moyens	73
3.4	Epidémiologie du groupe expérimental.....	74
IV.	ANALYSE ET DISCUSSION	76
1	Caractéristiques physiques des deux échantillons	76
2	Comparaisons des valeurs d'un même paramètre pour les deux groupes musculaires testés	77
3	Asymétries bilatérales.....	78
4	Comparaisons des paramètres entre les différents modes de contraction	79
4.1	Peak torque (PT).....	79
4.2	Peak torque relatif (PT/BW).....	80
4.3	Travail total (W)	81
4.4	Coefficient de variation (CV)	81
4.5	Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	81
5	Comparaisons entre les deux groupes	82
5.1	Peak torque (PT).....	82
5.2	Peak torque relatif (PT/BW).....	86
5.3	Travail (W)	87
5.4	Coefficients de variation (CV)	89
5.5	Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)	91
6	Comparaisons des valeurs de force de préhension globale (GS et GS/BW).....	93
6.1	Force de préhension globale de la main (GS)	93
6.2	Force de préhension globale ramenée par unité de masse corporelle (GS/BW)	94
V.	CONCLUSIONS	97
VI.	BIBLIOGRAPHIE	100

INTRODUCTION

L'escalade, dont les origines remontent à il y a plus de cent ans, a vu sa popularité augmenter considérablement au fil des dernières années.

Se présentant d'abord, pour les pionniers, comme une manière de conquérir un sommet, le visage de l'escalade a vite évolué en se répandant en Europe vers le milieu des années 1970, sous l'influence de jeunes grimpeurs européens.

Longtemps pratiquée exclusivement en rocher, en montagne ou ailleurs à l'extérieur, l'apparition au cours des 15 dernières années de salles d'escalade un peu partout en Europe a fait naître la pratique de l'escalade *indoor* ; initialement créée pour permettre d'assurer une continuité dans l'entraînement (mauvais temps, éloignement des sites...) cette pratique s'est développée considérablement au cours des dernières années pour aujourd'hui se détacher un peu de l'escalade en extérieur et former une discipline à part entière plus spécifique, transformant peu à peu ce sport de loisir en un sport de compétition.

Dans l'attrait actuel pour ces compétitions (organisées par différentes associations nationales ou internationales), le nombre de participants augmente, en proportion avec la difficulté des voies qui y sont proposées.

L'analyse de la littérature révèle de nombreuses études s'intéressant à la fois à la traumatologie spécifique mais aussi aux caractéristiques anthropométriques, dynamiques ou encore musculaires des grimpeurs. Toutefois, si beaucoup d'entre elles traitent de la biomécanique de *l'unité fléchissante du doigt* (voir plus loin), peu d'auteurs abordent l'articulation du poignet pourtant fréquemment citée dans les diverses pathologies associées à la pratique de ce sport.

C'est donc ce que cette étude se proposera de faire, via une évaluation isocinétique des muscles fléchisseurs et extenseurs du poignet à la fois chez des sujets sédentaires et chez des sujets pratiquant l'escalade à haut niveau, parallèlement à ça seront effectuées des mesures de force de préhension globale de la main grâce à un dynamomètre hydraulique.



Dave Graham dans *Shingen*, 8b+, Freyr, Belgique

PARTIE THEORIQUE

Pour commencer, il convient de bien scinder les différents aspects théoriques qui seront abordés et qui sont nécessaires à la compréhension de cette étude.

L'étude du complexe articulaire du poignet ainsi que de sa physiologie articulaire seront donc abordées à la fois pour une meilleure compréhension des mouvements testés mais aussi pour évaluer avec précision l'implication des différents muscles concernés par ceux-ci.

Les différentes méthodes d'évaluation de la force musculaire utilisées seront elles aussi envisagées et ce pour leurs aspects techniques mais aussi pour tenter d'évaluer leur reproductibilité et la fiabilité de leurs mesures.

Enfin, pour permettre de mieux cerner la population étudiée, nous envisagerons les différents aspects de l'escalade au travers des différentes études publiées à ce sujet, qu'il s'agisse de l'aspect historique et actuel, biomécanique, physiologique, anthropométrique ou encore physiopathologique.

I. ETUDE DU POIGNET.

1 Anatomie du complexe

1.1 Eléments osseux

L'articulation du poignet (figure 1) ou articulation radio-carpienne relie l'avant-bras et la main et pour être plus précis le radius et la première rangée des os du carpe. Cette articulation est formée par deux surfaces articulaires principales : la **cavité glénoïde antébrachiale** d'une part et le **condyle carpien** d'autre part. Le condyle carpien est lui formé par l'ensemble des surfaces articulaires supérieures du scaphoïde, du semi-lunaire et du pyramidal ; l'ensemble est plus étendu en avant qu'en arrière et regarde globalement vers le haut et l'arrière.

La cavité glénoïde antébrachiale est elle constituée de deux parties ; dans ses deux tiers externes elle correspond à l'extrémité inférieure du radius et au ligament triangulaire dans son tiers interne. Cette même extrémité du radius est elle-même divisée en deux parties bien distinctes ; une facette externe, triangulaire et une interne, quadrilatère répondant respectivement au scaphoïde et au semi-lunaire. La crête séparant ces deux facettes correspond à l'interligne articulaire entre ces deux os (82). Le **carpe** constitue l'ensemble des huit os situés entre l'avant bras et les os métacarpiens ; cet ensemble, concave en avant constitue le plancher et les murs latéraux du canal carpien. Conventionnellement, les huit os qui le constituent sont divisés en deux rangées (fig 3 et 4) ; une **rangée proximale** et une **rangée distale**, formant entre elles l'articulation médio-carpienne.

Figure 1 : Le poignet

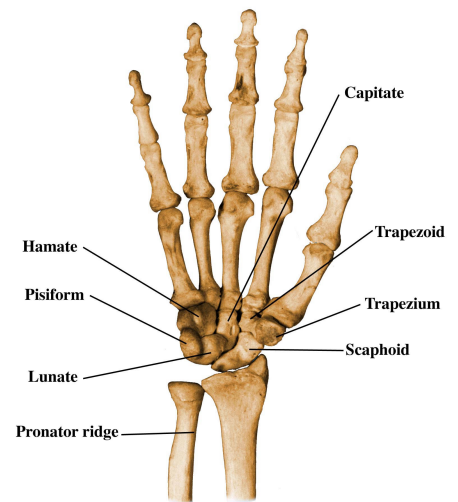


Figure 2 : Image radiologique du poignet

La rangée proximale, relativement mobile s'articule avec la cavité glénoïde antébrachiale pour former l'articulation radio-carpienne, elle est composée d'externe en interne par le **semi-lunaire** et le **pyramidal** (triquetrum).

La rangée distale, moins mobile, constitue un ensemble transverse formé de l'extérieur vers l'intérieur par le **trapèze**, le **trapézoïde**, le **grand os** (capitatum) et l'**os crochu** (hamatum). Cette deuxième rangée s'articule quand à elle avec les os métacarpiens pour former les articulations carpo-métacarpiennes.

Le **scaphoïde** enjambe anatomiquement ces deux rangées.

Figures 3 et 4 : Les rangées proximale et distale du carpe



D'après **Human anatomy.net**

Le huitième os du carpe, le **pisiforme**, fonctionne comme un sésamoïde, augmentant l'efficacité du plus puissant muscle moteur du poignet : le cubital antérieur ou fléchisseur ulnaire du carpe. Il forme sa propre petite articulation avec l'os pyramidal (68) et se comporte simplement au niveau biomécanique en « se contentant » de suivre les mouvements du poignet notamment lors de la flexion-extension (62).

1.2 Eléments capsulo-ligamentaires

Voir figure 5

1.2.1 La capsule articulaire

Il s'agit d'un simple manchon fibreux s'insérant sur le pourtour des surfaces articulaires de la radio-carpienne ainsi que sur les bords antérieur et postérieur du ligament triangulaire décrit ci-dessous (82).

1.2.2 Le ligament triangulaire ou disque articulaire de la radio-ulnarienne inférieure.

Ce ligament, en principe entité de l'articulation radio-ulnarienne inférieure, entre réellement dans la constitution de l'articulation radio-carpienne.

Il s'agit d'une lame fibro-cartilagineuse triangulaire, horizontale, placée entre le carpe et la tête de l'ulna. Ce ligament, tapissé de cartilage sur ses deux faces, s'attache à la fois au radius au niveau de sa cavité sigmoïde et à l'ulna à mi-chemin entre sa tête et son apophyse styloïde. Ses deux faces, inférieure et supérieure, sont articulaires. La supérieure répond à la facette inférieure de l'ulna et l'inférieure au semi-lunaire et au pyramidal.

Ce ligament sert à la fois de puissant moyen d'union entre le radius et l'ulna mais il complète surtout la cavité articulaire destinée à recevoir la tête de l'ulna (82).

1.2.3 Le ligament antérieur

Il se divise en deux faisceaux ayant pour origines respectives la marge antérieure et la styloïde radiale pour le faisceau radio-carpien (RL) et le bord antérieur du ligament triangulaire ainsi que la styloïde ulnaire pour le faisceau ulno-carpien (UL).

Afin de simplifier les choses nous décrirons les terminaisons de ces deux faisceaux comme généralisées sur le semi-lunaire, le pyramidal et le grand os, chacun des deux faisceaux semblant se diriger vers un point imaginaire situé au milieu du carpe.

Ces faisceaux assument selon **Nordin (1989)** un rôle de soutien des petits os sur lesquels ils s'insèrent.

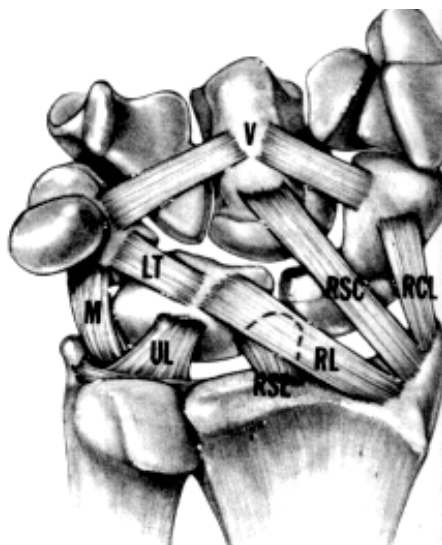
1.2.4 Le ligament postérieur

Il est globalement tendu entre le bord postérieur de la marge articulaire radiale et la face postérieure de l'os pyramidal. On lui décrit encore un faisceau radio-scaphoïdien dorsal dont le nom évoque les insertions.

1.2.5 Le ligament latéral externe ou ligament collatéral radial (RCL)

Ce ligament met en relation la styloïde radiale avec la face latérale du scaphoïde et de son tubercule. Celui-ci devrait selon **Nordin (1989)** être plutôt considéré comme le plus externe des ligaments antérieurs que comme un ligament latéral, du fait que la fonction d'un vrai ligament collatéral n'est pas possible dans une articulation comme le poignet.

Figure 5 : Anatomie ligamentaire simplifiée du poignet.



D'après **Mun Orthopedics**

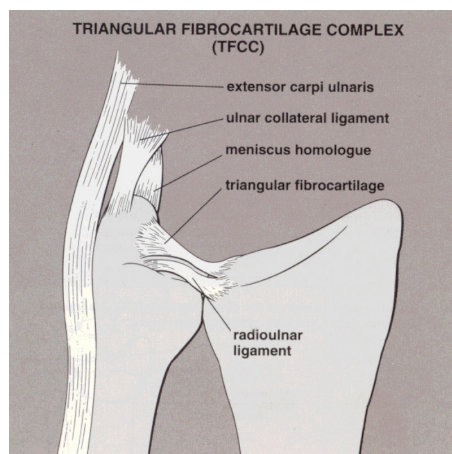
1.2.6 Le ligament latéral interne ou ligament collatéral ulnaire

Il prend son origine sur la styloïde ulnaire et se termine en deux faisceaux sur le pyramidal et l'os pisiforme. **Nordin** précise même une insertion sur la base du cinquième métacarpien.

Cette façon de présenter les choses est celle proposée par **Rouvière (1974)**, d'autres auteurs comme **Nordin (1989)** ont choisi de présenter le système ligamentaire du poignet d'une toute autre manière en décrivant deux catégories de ligaments : les intrinsèques, tendus du radius au carpe et du carpe aux métacarpiens, et les extrinsèques, trouvant leur(s) origine(s) et leur(s) terminaison(s) sur le carpe.

Pour **Nordin**, le système palmaire intrinsèque comprend le ligament latéral externe, les ligaments radio-carpiens palmaires et les composants du **complexe ulno-carpien** (figure 6), notion non abordée par **Rouvière**.

Figure 6 : Le complexe ulno-carpien ou complexe fibro-cartilagineux triangulaire



D'après **Bath O. (2002)**

Ce complexe est en réalité constitué par le ménisque homologue (ligament radio-pyramidal), le fibrocartilage triangulaire (disque articulaire), le ligament ulno-lunaire, le ligament latéral interne et les peu distinguables ligaments radio-ulnaires dorsaux et palmaires. Entre le ménisque et le fibrocartilage triangulaire se trouve une surface triangulaire, le recessus préstyloïdien, rempli de synovie.

Le système extrinsèque postérieur correspond au ligament postérieur décrit par **Rouvière**. Une autre distinction entre ces deux auteurs se fait au sujet des ligaments reliant les os du carpe entre eux, **Rouvière** associe ces ligaments aux articulations carpiennes et non plus à l'articulation du poignet à proprement parler alors que **Nordin** classe ceux-ci dans la catégorie de ligaments intrinsèques du poignet qu'il systématise en trois sous-catégories (courts, longs et intermédiaires).

Ces ligaments, d'une manière générale plus épais et plus robustes en palmaire qu'en dorsal, rendent pour **Taleisnik (1976)** et **Weber (1984)** la rangée distale des os du carpe en unité fonctionnelle essentiellement.

1.3 Eléments musculaires

D'un point de vue purement descriptif, nous nous contenterons de citer les différents tendons périarticulaires ainsi que leur situation. Les actions musculaires de ces muscles seront envisagées dans le chapitre consacré à la biomécanique. Aussi, les différentes insertions étant considérées connues, elles ne seront pas reprises de façon systématique. Un total de 24 tendons issus de 15 muscles croise le complexe articulaire du poignet. Parmi ceux-ci certains auteurs (68) semblent faire la distinction entre les tendons du

poignet et les tendons des doigts, cette classification se base évidemment sur les fonctions musculaires. Enfin, ceux-ci étant relativement nombreux nous nous contenterons d'illustrer les principaux muscles moteurs de du poignet (fig 7 et 8)

Figure 7 : Principaux muscles extenseurs du poignet

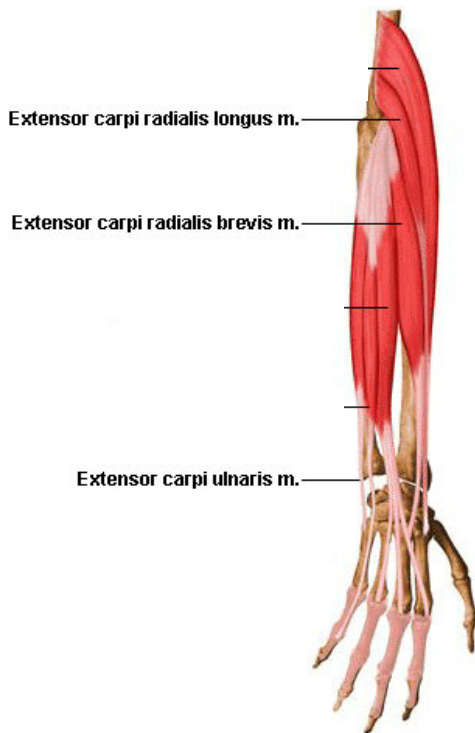
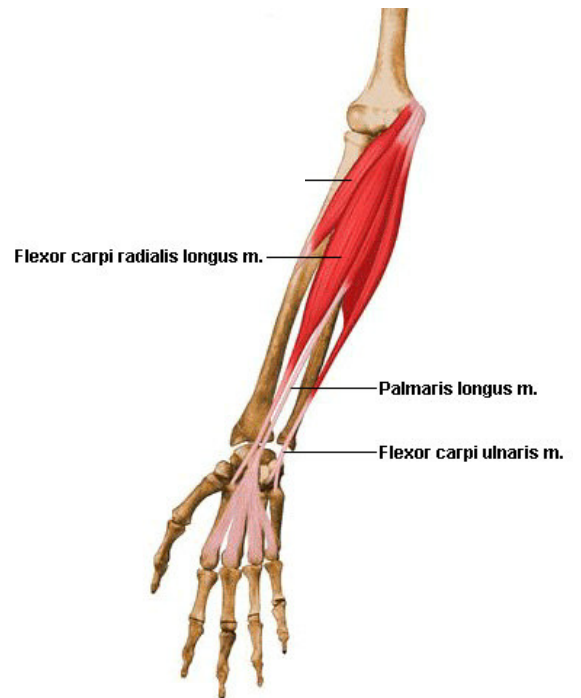


Figure 8 : Principaux muscles fléchisseurs du poignet



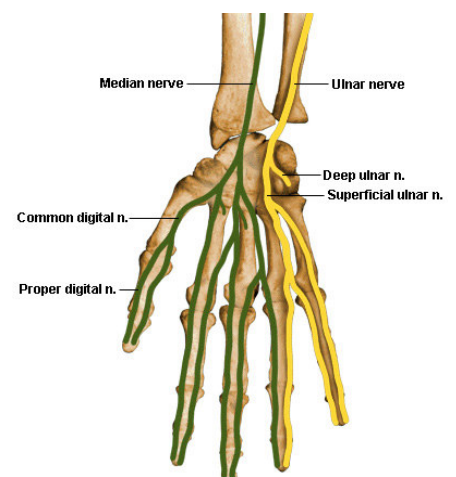
D'après **Human anatomy.net**

1.4 Eléments nerveux

Les nerfs croisant le poignet sont les nerfs ulnaire et médian (figure 9) passant respectivement dans le canal de Guyon et le canal carpien à la face antérieure du poignet et la branche terminale antérieure du nerf radial à sa face postéro-externe.

Figure 9 : Nerfs situés aux alentours du poignet

D'après **Human anatomy.net**



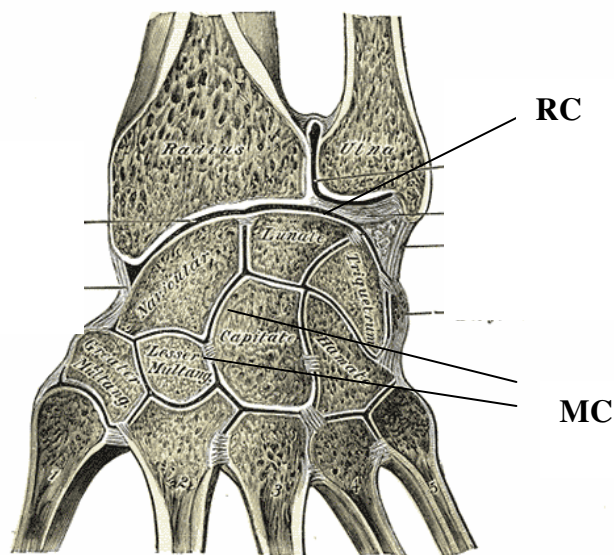
1.5 Eléments vasculaires

Le poignet est entouré d'un riche réseau artériel formé par différentes branches terminales issues des artères ulnaire et radiale, en l'occurrence l'arcade dorsale du carpe, l'artère radio-palmaire et l'artère ulno-palmaire. Pour rappel, l'arcade palmaire superficielle est issue de la rencontre de l'artère ulnaire et de l'artère radio-palmaire, alors que l'arcade palmaire profonde est formée par l'artère radiale et l'artère ulno-palmaire. Au niveau veineux, on retrouve la veine ulnaire superficielle du côté interne de la face dorsale du poignet et la veine radiale superficielle du côté externe issue de la réunion de l'arcade veineuse dorsale et de la veine céphalique du pouce.

2 Biomécanique du complexe articulaire du poignet

Si anatomiquement le poignet est encore appelé articulation radio-carpienne, au niveau biomécanique on distingue deux sous-articulations à ce complexe articulaire : **la radio-carpienne (RC)** et **la médio-carpienne (MC)** (Fig 10).

Figure 10 : Les articulations radio-carpienne et médio-carpienne



D'après Gray (1918)

La **RC** est une articulation de type **condylienne** à double courbure toutes deux convexes en haut à la fois dans le plan sagittal et dans le plan frontal ; cette double courbure est à l'origine des mouvements principaux de flexion-extension et d'inclinaisons.

La **MC**, séparant les deux rangées du carpe, se compose de deux parties : une partie externe plane de type arthroïde mettant en contact le scaphoïde au dessus avec le trapèze et le trapézoïde en bas, et une partie interne convexe de type condylienne délimitée en haut par la surface concave de l'ensemble scaphoïde, semi-lunaire et pyramidal et en bas par la surface convexe de la tête du grans os et de l'os crochu.

On décrit généralement au complexe articulaire du poignet quatre mouvements essentiels, régis par deux axes bien distincts :

- Les mouvements de **flexion** et d'**extension (FEM)**, autour d'un axe frontal passant par l'interligne *semi-lunaire/grand os* (52) ou situé entre la styloïde ulnaire et le pisiforme (75) (voir fig 11)

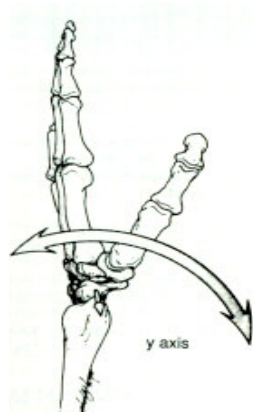


Figure 11 : Les mouvements de FEM

D'après **Mun Orthopedics**

- Les mouvements d'**inclinaisons radiale et ulnaire (RUD)** (encore appelés abduction et adduction), autour d'un axe sagittal passant au niveau de la tête du grand os (52) (voir fig 12)

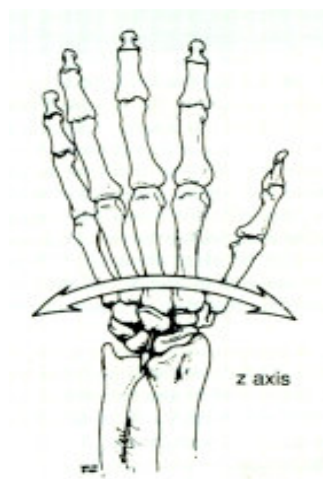


Figure 12 : Les mouvements de RUD

D'après **Mun Orthopedics**

Les mouvements de **FEM** impliquent à la fois la RC et la MC dans un rapport qui varie fortement en fonction des auteurs ; en effet **Kapandji (1978)** montre que classiquement la flexion est plus importante dans la RC que dans la MC (50° contre 35°) et inversement pour l'extension (50° MC, RC 35°) alors que **Sarrafian et al. (1977)** montre l'inverse dans des rapports quelque peu différents.

2.1 La dynamique du carpe

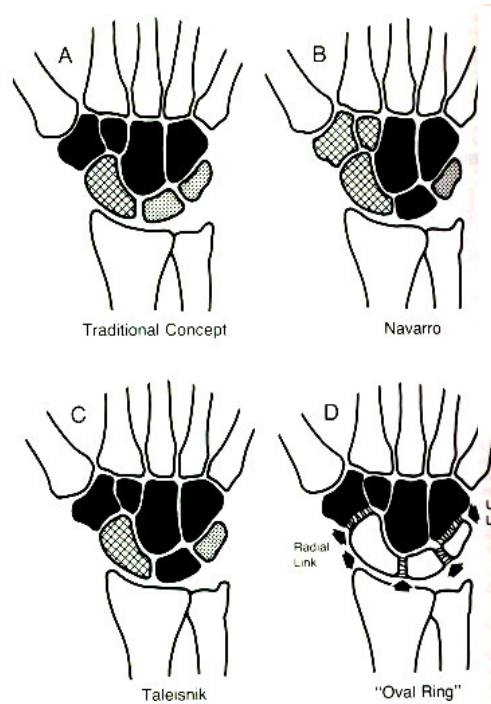
La configuration complexe de cet ensemble articulaire fait intervenir de nombreuses possibilités de petits mouvements au sein même du carpe, en effet chaque os du carpe possède de nombreuses articulations. La biomécanique de ces mouvements a été abordée par de nombreux auteurs ; il s'agit de petits mouvements de FEM, de bâillements latéraux, de rotations autour de leur axe longitudinal (52), certains parlent aussi de couples associés dans les mouvements comme par exemple le couple "grand os - 3^{ème} métacarpien" dans les FEM et RUD (67). **Feipel et al. (2003)**, a étudié ces mouvements des os du carpe grâce à des reconstructions 3D (CT scan). Cette étude, en mettant en évidence certains couples de mouvements particuliers pas toujours en accord avec le reste de la littérature, confirme notamment la variabilité des caractéristiques cinématiques des os du carpe (à la fois dans la nature et la direction de ces mouvements) mais aussi d'importantes différences d'amplitudes articulaires. Les résultats de cette étude donnent une explication quant à l'existence de nombreux modèles biomécaniques visant à expliquer le fonctionnement complexe de cette articulation, de nombreuses classifications et donc aussi de nombreuses options de traitement différents dans le domaine de la traumatologie du poignet.

En tenant compte des récentes données fournies par la littérature (notamment **Neu et al., 2001**) et des résultats fournis par cette étude, il semble qu'un seul et unique modèle fonctionnel du poignet ne puisse être déterminé ; cependant de nombreuses propositions ont déjà été faites (fig 13) par différents auteurs ; il ne nous appartient pas ici de prendre parti pour l'un ou l'autre de ces modèles que nous ne ferons que décrire succinctement.

A part le concept traditionnel reposant sur les deux rangées proximale et distale (**A**), **Taleisnik (C)** parle de colonnes de mobilité différentes comme l'avait déjà fait **Navarro** auparavant (**B**); le scaphoïde en tant que colonne mobile externe, le pyramidal en tant que colonne interne rotatoire, et le semi-lunaire ainsi que toute la rangée distale du carpe en tant que siège des mouvements de FEM. **Lichtman (D)** parle de concept de l'*oval ring* réduisant

le carpe à deux maillons mobiles (interne et externe) transmettant les différents mouvements entre les deux rangées.

Figure 13 : Différents modèles biomécaniques



D'après **Mun Orthopedics**

Les raisons de ces variations individuelles - peut-être osseuses, ligamentaires (52), ou musculaires – restent à déterminer.

Mohammad A Upal (2003) a étudié la cinématique de ces os lors d'un mouvement plus complexe et plus fonctionnel partant d'une position d'extension-pronation à une position de flexion-supination, il en conclut notamment que le couple trapèze-trapèzoïde ne se comporte pas comme un bloc unitaire, induisant donc une complexité supplémentaire à la réalité biomécanique de l'ensemble.

En plus de ces mouvements, viennent s'ajouter des petits mouvements de rotation axiale chez certains sujets (68).

2.2 Axes de mouvement et centres de rotation

Plusieurs points de vue existent sur la localisation exacte du centre articulaire du poignet. Certains auteurs proposent que la mobilité globale du poignet soit centrée autour d'un point

situé dans le grand os, considérant alors le poignet comme une entité articulaire dont tous les axes de mouvement passeraient par le même centre de mouvement.

D'autres décrivent enfin différentes situations quant à ces axes de mouvement ; pour certains, ces axes de FEM et de RUD sont orthogonaux et perpendiculaires sans intersection dans le grand os, pour d'autres ils sont obliques l'un par rapport à l'autre (67).

Enfin, certains auteurs décrivent un troisième axe de mouvement ; l'axe de pro/supination (66) que d'autres considèrent à juste titre comme partie intégrante de la cinématique radio-cubitale.

2.3 Amplitudes de mouvements

Les amplitudes de mouvement (ROM) varient d'un auteur à l'autre, le tableau 1 reprend celles reprises par quelques auteurs différents. Malgré les différences dans l'absolu, il ressort des similitudes de l'un à l'autre : la flexion et l'extension sont peu différentes et avoisinent souvent les 90° avec cependant une flexion légèrement supérieure et l'inclinaison ulnaire est clairement plus ample que la radiale, avec un rapport proche du triple en faveur de la première.

Tableau 1 : Valeurs de ROM dans la littérature

Auteurs	Flexion	Extension	SB ulnaire	SB radiale
Sarrafian et al.,1977	66° (de 38° à 102°)	55° (de 31° à 70°)	/	/
Kapandji, 1978	85°	85°	45°	15°
Youm et al.,1978; Volz et al.,1980			35°-37°	15°-20°
Cornu et al.,2003	108,9°±20,9°	79,65°±39,77°		
Dumontier C., ?	85°	85°	30°-45°	15°-25°

SB Side bending ou inclinaison

2.4 Actions musculaires

De part sa configuration anatomique, il est évident que le complexe du poignet est compliqué en terme en matière de biomécanique musculaire ; il n'y a en effet à part le FCU (cubital antérieur) aucune insertion tendineuse sur les os du carpe directement et les mouvements de ce complexe se font de façon indirecte via l'action de muscles insérés proximale ou distalement.

Nordin (1989) décrit les muscles moteurs du poignet comme 3 fléchisseurs et 3 extenseurs régissant à eux seuls la mobilité du poignet en FEM et en RUD. Ces muscles sont :

Pour les fléchisseurs

- Le **flexor carpi ulnaris (FCU)** ou cubital antérieur
- Le **flexor carpi radialis (FCR)** ou grand palmaire
- Le **palmaris longus (PL)** ou petit palmaire (inconstant)

Pour les extenseurs

- L'**extensor carpi radialis longus (ECRL)** ou premier radial
- L'**extensor carpi radialis brevis (ECRB)** ou deuxième radial
- L'**extensor carpi ulnaris (ECU)** ou cubital postérieur

D'une manière générale **Kapandji (1978)** classe très clairement ces mêmes muscles en quatre groupes, se répartissant chacun dans un des quatre secteurs délimités par les axes des mouvements de FEM et de RUD.

Deux secteurs pour la FEM, deux pour la RUD ; les actions musculaires de chacun de ces muscles dépendent donc, en position anatomique, de sa situation par rapport à ces deux axes.

On décrit donc :

- Un groupe fléchisseur et inclinateur ulnaire (**FCU**)
- Un groupe fléchisseur et inclinateur radial (**FCR, PL**)
- Un groupe extenseur et inclinateur ulnaire (**ECU**)
- Un groupe extenseur et inclinateur radial (**ECRB, ECRL**)

Etant donné cette situation de mixité dans les composantes musculaires décrites ci-dessus, il est évident que pour obtenir un mouvement pur au sein de l'articulation il est indispensable de faire intervenir une compensation synergique d'un autre groupe musculaire recruté pour annuler la composante de mouvement parasite engendrée par le groupe musculaire du mouvement primaire. **Kapandji (1978)** exprime cette situation sous le nom de relation **d'antagonisme-synergie musculaire**.

De cette loi découle directement une des actions du muscle FCR (grand palmaire) ; en effet, sa composante d'inclinaison radiale n'a de sens que dans le mouvement d'inclinaison radiale emmené essentiellement par le ECRL, pour contrecarrer la composante d'extension du poignet de celui-ci (action synergique).

Cet exemple doit nous pousser à envisager les actions musculaires de façon beaucoup plus nuancée que simplement en se fiant à la position biomécanique de ceux-ci par rapport à un axe articulaire.

En plus de ces muscles moteurs évidents, **Kapandji (1978)** souligne encore une éventuelle contribution des muscles fléchisseurs profonds et superficiels (FCPD et FCSD) et extenseurs propres (extenseur commun des doigts, extenseur propre du V et extenseur propre du II) des doigts dans les mouvements de FEM ; pour ce qui est de la flexion, les FCPD et FCSD interviennent si leur course est interrompue et bloquée en cours, comme par exemple si les doigts maintiennent une poignée et que le poignet réalise une flexion à ce moment là. Cette situation se présente dans le cas du test isocinétique proposé dans cette étude (voir protocole expérimental). De même **Kapandji** cite une contribution des extenseurs des doigts dans l'extension du poignet lorsque le poing est fermé. Cependant, pour **Nordin (1989)** ces muscles extrinsèques des doigts sont situés en profondeur et à proximité de l'axe de FEM réduisant leur bras de levier et donc leur efficacité sur le poignet, au contraire des muscles extrinsèques du poignet situés plus en périphérie par rapport à cet axe et au poignet en général.

Cependant, cette contribution nous intéresse directement dans le cadre de ce mémoire, en effet il sera intéressant d'envisager la force des fléchisseurs du poignet dans l'absolu chez des grimpeurs dont la force des doigts (et donc des muscles fléchisseurs profonds des doigts) est supérieure à celle d'une population normale (**Quaine et al., 2003**). C'est de ces observations que pourront peut-être être tirées des informations quant à l'implication relative des muscles fléchisseurs des doigts dans la flexion active du poignet.

2.5 Interactions entre mouvements du poignet et de la main

La position et la mobilité du poignet sont essentielles pour placer la main en situation optimale pour réaliser avec précision différentes tâches avec les doigts. A ce titre différents auteurs parlent d'une position « *de fonction* » pour le poignet, à savoir une position correspondant à l'efficacité maximale des fléchisseurs de doigts ; il s'agit d'une position en extension et inclinaison ulnaire du poignet (voir tableau 2).

En effet, toute modification dans la position du poignet altère la tension dans les muscles extrinsèques propres des doigts, ceci permettant d'augmenter avec précision les bras de levier et donc l'efficacité de l'un ou l'autre groupe musculaire en fonction de la tâche à réaliser.

Cette relation entre poignet et doigts trouve certainement une application en escalade ; en effet, la position du poignet est fondamentale pour optimiser le bras de levier des tendons fléchisseurs profonds et superficiels et rendre optimale la force nécessaire pour la prise de main.

Tableau 2 : Position de fonction du poignet dans la littérature

Auteurs	Extension	SB ulnaire
Kapandji, 1978	40°-45°	15°
Volz et al.,1980	20°	/
Hazelton et al.,1975	/	citée mais non chiffrée
Li et al., ?	20°	5°

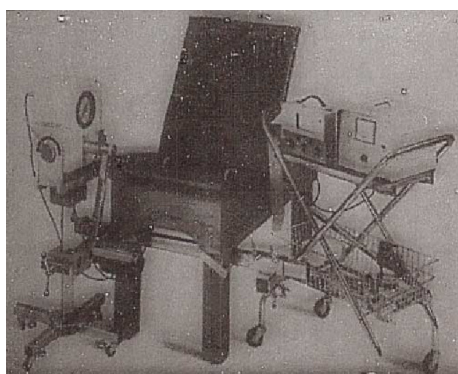
Malgré les quelques différences d'un auteur à l'autre, on s'aperçoit que la force des fléchisseurs des doigts augmente dans tous les cas avec un poignet positionné en légère extension et inclinaison ulnaire, en ne dépassant toutefois pas 40° d'extension (**Volz et al., 1980**). Le protocole de test de force de préhension globale de la main recherchera une telle position.

II. LA METHODE ISOCINETIQUE

1 Historique

Connue depuis le début des années 70', la méthode isocinétique n'a pas toujours été ce qu'elle est à l'heure actuelle à savoir une méthode de rééducation et d'évaluation musculaire fiable et de haute précision. C'est plus précisément en 1967 qu'a été créée la première machine digne de ce nom : le **Cybox I** (Fig 14), composé uniquement du dynamomètre isocinétique.

Figure 14 : Le Cybox I



D'après **E.I.S. (2001)**

Figure 15 : Le Cybox II



D'après **E.I.S. (2001)**

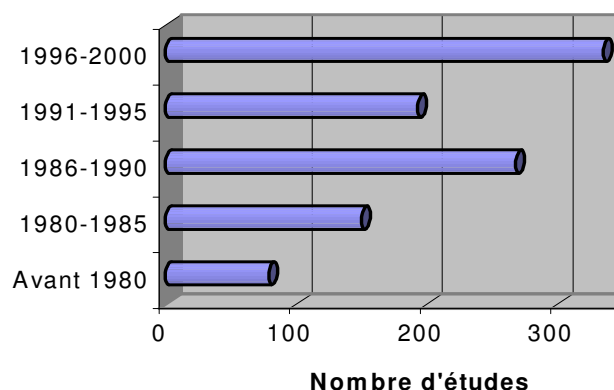
Ce n'est que depuis le milieu des années 80' que la technologie a permis d'améliorer les performances de ces machines notamment grâce aux logiciels permettant de commander ces appareils (**Cybox II, Biodex, Kin-Com,...**) (27).

L'utilisation de cette méthode s'est vue augmenter depuis, à la fois dans le domaine de l'évaluation et de la rééducation. Actuellement, nombreuses sont les études s'appuyant sur l'isocinétisme soit pour en évaluer les effets en terme d'efficacité en rééducation, soit pour évaluer la force d'un groupe musculaire en particulier de façon plus ou moins reproductible et fiable, soit encore pour évaluer la fiabilité des appareils en eux-mêmes.

Ce nombre d'études n'a fait qu'augmenter depuis quelques années (voir fig 16).

Figure 16 : Evolution du nombre d'études réalisées grâce à l'isocinétisme

D'après **Bouilland et al. (2001)**



2 Définition - Principes - Description .

2.1 Définition

Le vocable isocinétisme est attribué à la méthode utilisée à la fois en rééducation mais aussi en évaluation de la fonction musculaire, on entend étymologiquement par isocinétisme « même vitesse » et il s'agit là en effet d'un des 2 grands principes de cette méthode.

2.2 Principes

2.2.1 La maîtrise de la vitesse.

On parle de maîtrise de la vitesse dans le sens où on impose une vitesse constante au mouvement du segment de membre, au lieu de lui imposer une résistance fixe.

2.2.2 L'asservissement de la résistance.

La résistance varie et s'auto-adapte en tous points de l'amplitude de mouvement pour être égale à la force développée par le muscle, lorsque la vitesse présélectionnée est atteinte (15). Ce principe autorise, à l'inverse de l'exercice isotonique, le développement d'un moment de force maximum sur toute l'amplitude du mouvement (19,20).

Autrement dit, *la vitesse du mouvement*, imposée par l'expérimentateur, *reste constante par l'intervention d'une résistance variable, asservie en permanence aux capacités d'effort du sujet* (19,20).

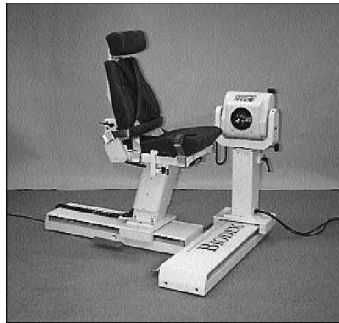
Les amplitudes de mouvement sont définies préalablement et ne peuvent être dépassées grâce à des butées soit mécaniques soit électroniques.

La gamme de vitesses utilisables s'étend de 0°/s à 300°/s en excentrique et de 0°/s à 500°/s en concentrique.

2.3 Description

L'appareil utilisé a été un dynamomètre isocinétique de type **Biodex™ System 3 Pro** (voir figure 17), plusieurs modules (embouts) permettent d'adapter la machine pour l'évaluation de l'une ou l'autre articulation.

Il est constitué de plusieurs éléments :

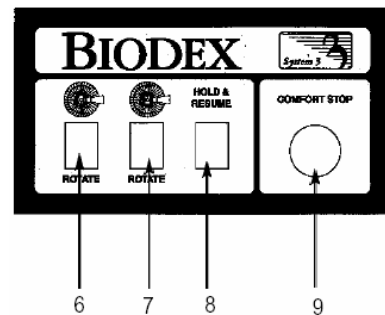
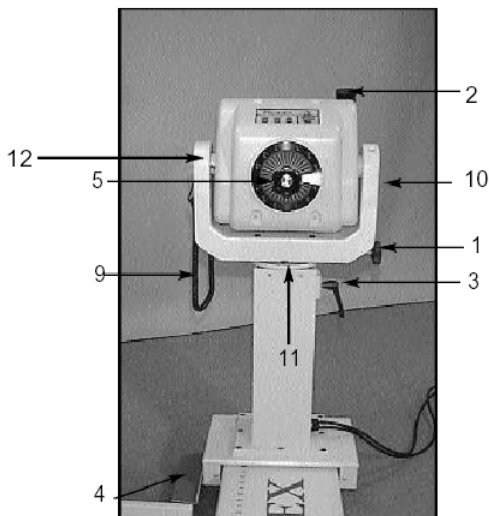


- Le dynamomètre
- Les accessoires
- Le logiciel

Figure 17 : Le Biodex™ System 3 Pro

2.3.1 Le dynamomètre

Il assure la constance de la vitesse (isocinétisme) présélectionnée, il est aussi relié à un goniomètre électronique permettant la mesure de l'amplitude parcourue lors du mouvement.



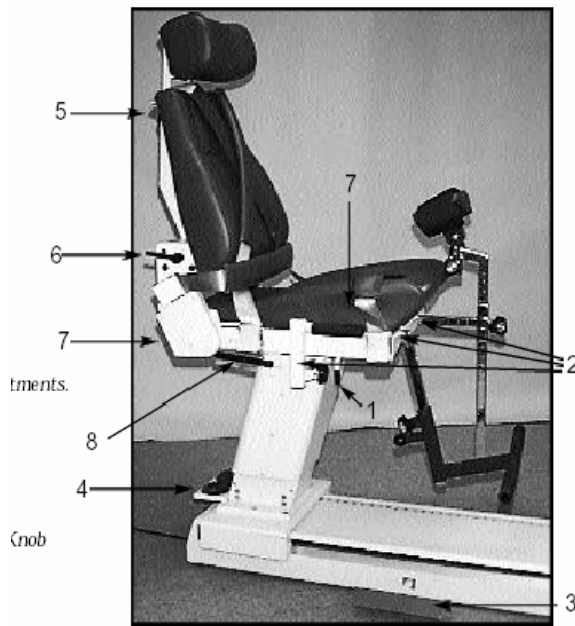
1. Rotation horizontale
2. Rotation antéro-postérieure
3. Réglage de la hauteur
4. Pédale de déplacement sur le rail
5. Vis de serrage des embouts
10. Embout de stockage de la vis
11. Disque gradué en degrés
12. Support du dynamomètre

6. Rotation horaire de l'axe
7. Rotation anti-horaire de l'axe
8. Blocage et déblocage du système
9. Bouton de sécurité

D'après **Biodex Medical Systems, Inc.**

2.3.2 Les accessoires

Il s'agit du siège mais aussi de tous les accessoires permettant l'adaptation de la machine aux différents groupes musculaires (module épaule, genou, tronc, cheville,...poignet) et leur fixation ainsi que la fixation du sujet sur le siège (sangles,...).



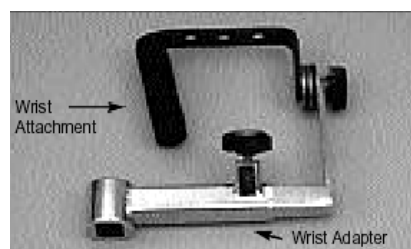
1. Poignée de rotation du siège
2. Réception pour appuis annexes
3. Pédale pour le déplacement du siège
4. Pédale pour la hauteur du siège
5. Ajustement de la tête
6. Réglage de l'inclinaison du siège
7. Réglage de l'avancement du dossier par rapport au siège
8. Poignée de stabilisation

D'après **Biomedex Medical Systems, Inc.**

Pour l'évaluation du poignet il existe une poignée spéciale permettant une bonne préhension et un bon alignement des axes (voir fig 18).

Nous verrons toutefois que cette configuration présente quelques imperfections rendant difficile la réalisation reproductible des tests d'évaluation.

Figure 18 : Module poignet



D'après **Biomedex Medical Systems, Inc.**

2.3.3 Le logiciel

Le système informatique (fig 19) permet l'enregistrement, le stockage et le traitement des données. Il permet aussi d'assurer la sécurité du patient durant le test puisque les protocoles prévoient l'interruption de la session en cas d'incident (15).

Le système permet enfin de prendre en compte et de corriger les effets de la pesanteur par soustraction du poids de membre (15, 19,20).

Il est possible de piloter la machine à partir du PC mais aussi à partir d'un panneau de contrôle (fig 20) pour des applications plus simples ne nécessitant pas l'intervention de l'ordinateur.

Figure 19 : Le système informatique



Figure 20 : Le panneau de contrôle



D'après **Biodex Medical Systems, Inc.**

3 Les paramètres mesurés

Bouilland et al. (2001) et **Croisier et al., (1999)** distinguent les paramètres graphiques (courbes) des paramètres numériques ; seuls ces derniers nous intéresseront dans ce cas :

3.1 Le peak torque (PT) ou moment de force maximale.

Exprimé en Newton-mètre (Nm), il correspond au moment de force le plus élevé développé au cours du mouvement, au sommet de la courbe (encore appelé pic de couple, ou moment maximum).

3.2 Le travail maximum (W).

Il correspond à l'intégration de la surface située sous la courbe des moments de force, et s'exprime en joule (J). Ce paramètre est dépendant de l'amplitude globale du mouvement.

3.3 Le peak torque relatif (PT/BW).

Il correspond à un rapport entre le PT et la masse corporelle, cette mesure a l'avantage de donner une information relative et comparable entre individus, exprimée en Nm/kg.

3.4 La puissance (P).

Exprimé en watts (W), ce paramètre intègre les valeurs de moment de force et de vitesse d'exécution du mouvement. Elle se calcule en multipliant le moment de force par la vitesse angulaire, elle correspond encore au rapport du travail effectué par unité de temps.

3.5 L'angle d'efficacité maximale (AEM).

Il mesure la position angulaire correspondant au moment de force maximale et s'exprime en degrés.

3.6 Le rapport agoniste/antagoniste.

Exprimé en pourcentage, il est calculé à partir des moments de force maximaux développés lors d'un même mode de contraction et pour une vitesse angulaire identique. Par exemple un ratio extenseurs/fléchisseurs de 57% doit être interprété comme le fait que la force des extenseurs équivaut à 57% de celle des fléchisseurs, à la même vitesse et en même mode.

3.7 La comparaison bilatérale pourcentuelle.

Elle représente une valeur exprimée sous la forme d'un déficit (valeur négative) ou d'un gain (valeur positive) ; intérêt en rééducation pour se référer au membre sain.

3.8 L'amplitude de mouvement parcourue (ROM, range of motion).

Elle reflète l'amplitude de l'angle articulaire balayé par le poignet au cours de tout le mouvement ; elle est personnelle à chaque sujet et des blocages permettent sur la machine de ne pas dépasser les limites prédéfinies pour le patient en fonction de sa souplesse articulaire

3.9 Les coefficients de variation (CV).

Leur observation permet de rendre compte de la reproductibilité des mesures, plus les mesures sont faibles et plus elles sont reproductibles et fiables, ils sont le plus souvent exprimés en pourcentages (%).

Les intérêts pratiques de cette étude nous pousseront à ne retenir que certains de ces paramètres ; ceux-ci seront développés avec les résultats dans la partie pratique.

4 Biomécanique spécifique de l'isocinétisme

4.1 Les modes

La plupart des dynamomètres isocinétiques permettent l'évaluation musculaire dans plusieurs modes différents.

4.1.1 Le mode concentrique

Il s'agit d'un mode de contraction s'accompagnant d'un rapprochement des points d'insertion du muscle ou du groupe musculaire agoniste. Cette contraction apparaît quand la tension générée au sein du muscle est suffisante pour vaincre une résistance.

4.1.2 Le mode excentrique

Ce mode de contraction apparaît lorsque la résistance appliquée au groupe musculaire est plus importante que la force qu'il développe, ce dernier accomplit donc un travail négatif ou

freinateur. La contraction du muscle agoniste s'accompagne d'un éloignement de ses points d'insertion musculaires.

4.1.3 Le mode isométrique

Le mode isométrique représente une situation d'équilibre constant entre les deux forces exercées (force musculaire et résistance). La contraction ne s'accompagne d'aucune modification de longueur musculaire agoniste.

4.1.4 Le mode passif

Ce mode, utilisé beaucoup plus rarement, réduit l'appareil d'isocinétisme à un simple arthromoteur. Il n'y a là aucune participation active de la part du patient.

4.2 La relation force – vitesse

Il existe une relation directe entre la force et la vitesse à laquelle elle est produite, cependant cette relation est différente suivant le mode de contraction :

- En concentrique : on observe généralement une diminution du couple de force maximal avec l'augmentation de vitesse. La raison est sûrement due au fait que les fibres I et II sont activées simultanément à vitesse basse mais lorsque la vitesse augmente moins de fibres I sont recrutées. **Kannus et al. (1994)** montre qu'à vitesses très élevées ce ne sont que de très faibles populations de fibres qui sont recrutées. **Poullis et al. (2003)** annonce quant à lui que les filaments actine-myosine disposent de trop peu de temps pour développer la tension requise pour la production de beaucoup de force à vitesse élevée.
- En excentrique : cette relation tend classiquement à s'inverser en excentrique avec des forces souvent plus importantes à vitesses élevées.

Poullis et al. (2003) confirme cette relation en mode concentrique pour des tests de poignet en flexion et en extension ; en effet il montre des valeurs de travail musculaire et de PT moyens supérieures à 45°/s qu'à 90°/s ou 180°/s, et ce pour les deux groupes musculaires testés (extenseurs et fléchisseurs). Il met aussi en évidence une diminution de la puissance avec l'augmentation de vitesse, cette diminution est expliquée par la diminution du temps d'exercice ($P=W/t$). **Forthomme et al. (2002)** confirme cette relation.

4.3 Le rapport excentrique – concentrique

Il représente le rapport entre le couple maximal en excentrique et le couple maximal en concentrique.

Ce rapport est dépendant de la vitesse et peut augmenter proportionnellement avec la vitesse.

Trudelle-Jackson et al. (1989) montre que le rapport EC est inférieur à 0.85 à basses vitesses, mais généralement compris entre 0.95 et 2.05.

5 Reproductibilité des mesures de l'appareil.

Plusieurs études, purement techniques, ont tenté d'évaluer la reproductibilité du **Biodex™ System 3 Pro** sans le tester directement sur des sujets mais en évaluant la validité intrinsèque de ses valeurs. **Drouin et al. (?)** montre que l'appareil donne des valeurs reproductibles de couples et de positions dans les amplitudes de mouvement habituellement utilisées en évaluation, l'auteur met cependant en évidence tout comme **Valovitch et al. (?)** des imprécisions de mesures au-delà de 300°/s. Ce dernier montre lui aussi une bonne reproductibilité mécanique de l'appareil dans tous les paramètres évalués.

Plusieurs facteurs techniques influencent directement la reproductibilité des mesures, ils seront décrits dans la partie expérimentale (15).

6 Isocinétisme et poignet

Ce point en particulier ne constitue en aucun cas un compte rendu complet de la question, il s'agit simplement d'introduire ici le sujet en essayant de montrer où se situe l'évaluation isocinétique du poignet dans la littérature actuelle. Le principal sera renseigné dans la partie expérimentale de ce travail.

Très peu nombreuses sont les études portant leur attention sur l'évaluation isocinétique du poignet. En effet, **Bouilland et al. (2001)** montre dans une méta analyse de la littérature concernant l'isocinétisme que le poignet est l'articulation la moins étudiée (tableau 3).

Tableau 3 : Répartition des études isocinétiques

Articulation	Nombre d'articles publiés
Tronc	66
Hanche	29
Genou	425
Cheville	61
Epaule	84
Coude	40
Poignet	5

D'après **Bouilland et al. (2001)**

En effet, peu de littérature s'étend sur ce sujet et seuls quatre études, récentes, ont été trouvées (30,75,86,89).

Poullis et al. (2003) a montré que la taille de la poignée de main permettant de réaliser le test n'avait aucune influence sur la relation force-vitesse des muscles fléchisseurs et extenseurs du poignet en isocinétisme, cependant il montre des valeurs significativement plus importantes de PT (Nm), et de W (J) avec une poignée de plus petit diamètre et ce dans les deux modes concentrique et isométrique, et pour les deux groupes musculaires envisagés.

Il montre aussi (en citant **Van Swearingen et al., 1983**) que les PT en isométrique sont apparentés aux PT en concentrique à vitesses basses. D'après lui les muscles fléchisseurs du poignet sont ceux qui développent la force la plus importante suivis des abducteurs (inclinaison radiale), des adducteurs (inclinaison ulnaire) et enfin des extenseurs avec une force équivalente à 52% de celle des fléchisseurs.

III. PRESENTATION DU SPORT ET DE LA POPULATION ETUDIEE.

1 Types de pratique

1.1 L'escalade en extérieur

Pratiquée en rocher un peu partout en Europe, elle nécessite tout comme l'escalade en salle un



Nicolas Favresse dans *Masque à gaz*, 8B, Freyr, Belgique

certain matériel permettant d'assurer un minimum de sécurité (corde, baudrier, moyen d'assurance, dégaines, mousquetons à vis, sangles, chaussons,...).

Elle a pour particularité d'être beaucoup plus technique que l'escalade en salle et de rendre nécessaires de bonnes capacités d'analyse face au rocher dont la structure elle-même détermine la manière de passer.

Elle est le plus souvent pratiquée en tête, ce qui signifie que le grimpeur monte avec la corde depuis le bas et la passe régulièrement dans des dégaines accrochées sur des broches métalliques fixées dans le rocher par l'ouvreur de la voie.

1.2 L'escalade en salle ou sur mur

Cet aspect de l'escalade s'est considérablement développé au fil des dernières années, amenant la construction de nombreuses salles indépendantes, centres sportifs équipés d'un mur ou autres associations.

Elle se déroule grâce à des prises artificielles posées sur le mur, ces prises posées successivement les unes à la suite de l'autre forment une voie dont la difficulté peut ainsi être décidée par celui qui l'ouvre, qui la construit.



Alexandre Chabot, manche de la coupe du monde 2003, Valence

C'est essentiellement dans ce domaine que se déroulent les compétitions, étant donné l'aspect pratique beaucoup plus facile à gérer dans une infrastructure telle qu'une salle.

Sauf en compétition, cette pratique se déroule souvent en moulinette, à savoir que la corde passe en haut de la voie dans deux mousquetons et le grimpeur s'encorde sur un brin de corde alors que l'assureur le protège en assurant sur l'autre brin.

2 Disciplines

2.1 La difficulté

La difficulté consiste à grimper des voies de hauteur relativement longue (entre 15 et 50 mouvements en général ; entre 10 et 40 mètres). C'est probablement la discipline la plus fréquemment disputée en compétition, elle consiste à devoir réaliser plusieurs voies de difficultés croissantes au fil de l'avancement dans la compétition, ces voies sont de difficulté progressive pour se terminer avec des mouvements de plus en plus durs. Le vainqueur est celui qui monte le plus haut ou qui enchaîne dans la voie de finale.

2.2 Le bloc

Cette discipline se déroule sur des blocs de rocher ou artificiels relativement bas (dépassant rarement six mètres), elle ne nécessite donc pas de matériel d'assurance (pas de corde, pas de baudrier,...). Le bloc est une discipline explosive, beaucoup plus courte, mettant en jeu des mouvements plus physiques.

Jerome Meyer, Coupe du monde de bloc – Gap 2001



2.3 La vitesse

Il s'agit d'une discipline beaucoup plus rare, et moins technique, dans laquelle c'est le temps nécessaire pour atteindre le sommet de la voie qui détermine le vainqueur.

3 Les critères de réussite

On dit qu'une voie a été réussie, ou enchaînée lorsque le grimpeur est arrivé jusqu'en haut sans tomber et sans se reposer en tension sur la corde .

4 Les modes de réussite

4.1 Le « à vue »

Réussir une voie ou un bloc « à vue » signifie que le grimpeur a rempli les critères de réussite sans jamais avoir essayé, vu quelqu'un d'autre essayer, ou voir eu des conseils sur cette même voie ou bloc auparavant.

4.2 Le « flash »

Un peu moins fréquemment on parle de réussir une voie, ou un bloc « flash » lorsque les conditions de réussite sont remplies dès la première fois mais soit en ayant vu quelqu'un essayer (ou enchaîner), soit en ayant eu des conseils sur la façon de passer.

4.3 Le « après travail »

On parle de réussite après travail lorsqu'il a fallu plus de trois essais avant de réussir la voie ou le bloc, sans quoi on parle aussi de réussite au premier (après la tentative à vue), au deuxième ou encore au troisième essai.

5 Les niveaux

Excepté en compétition, il n'existe pas de réels critères objectifs permettant d'évaluer les performances d'un grimpeur. Le tableau 4 reprend les différentes échelles de niveaux existant actuellement parmi les différents pays cités; ce classement ne fait qu'établir des points de repère parfois difficiles à établir, c'est à partir de là qu'un grimpeur peut décider ou non de faire telle ou telle voie. Les cotations sont fixées lorsque plusieurs grimpeurs confirment la difficulté annoncée par comparaison avec d'autres voies du même style dont la cotation a déjà été confirmée. La difficulté dépend de nombreux facteurs comme la taille des prises, leur orientation, l'espacement qui les sépare, le relief de la voie, son inclinaison, sa longueur,...

Tableau 4 : Comparaison des échelles de difficulté par pays

	France	USA	GB	
Débutant		5.1		
	4	5.3		
	4+	5.5		
Intermédiaire	5	5.7		
	5+	5.9		
	6A	5.10a	5B	
	6A+	5.10b		E2
	6B	5.10c		
Avancé	6B+	5.10d	5C	
	6C	5.11a		E3
	6C+	5.11b		
	7A	5.11c	6A	
	7A+	5.11d		E4
Expert	7B	5.12a	6B	
	7B+	5.12b/c		E5
	7C	5.12d	6C	
	7C+	5.13a/b		
	8A	5.13c		E6
	8A+	5.13d	7A	
	8B	5.14a		E7
	8B+	5.14b		
	8C	5.14c	7B	
	8C+	5.14d		
	9A			
	9A+			
	9B			

6 Aspect physiologique et métabolique de l'effort.

L'escalade a longtemps été considérée comme une activité purement anaérobie, cependant de récents travaux ont montré une augmentation importante et inattendue de fréquence cardiaque, de consommation d'oxygène et de concentrations sanguines d'acide lactique (14,45,61,91,100,101) lors d'efforts d'escalade sous-maximaux démontrant une imbrication de plusieurs filières métaboliques dont la filière aérobie, avec cependant un non respect de la linéarité entre VO₂ et FC ; ceci semble être du au fait que l'escalade nécessite l'utilisation de contractions isométriques intermittentes de la musculature (des bras essentiellement) (6,14,61,91).

Mermier et al. (1997) montre aussi des différences significatives entre trois niveaux de voies réalisées en progression (voie facile sur mur vertical, voie moyennement difficile sur mur en dévers de 10°, et finalement voie difficile en dévers de 45°) pour ces paramètres (FC, [lacates] sanguins, VO₂ et dépense énergétique). Il montre aussi, pour ces mêmes voies, une augmentation de FC

jusqu'à 74-85% des valeurs prédites maximales et la dépense énergétique équivalait à celle décrite pour un jogging à vitesse modérée (± 9 km/h).

Sheel et al. (2003) parle de VO₂ de 45% et 51% des valeurs maximales issues d'une épreuve d'effort (EE) pour deux voies respectivement plus facile et plus dure mais toutes deux sous maximales. Enfin, **Booth et al. (1999)** semble montrer des valeurs moins importantes en extérieur qu'en salle (75% des valeurs de VO₂ et 83% des valeurs de FC).

Dans des études plus axées sur les doigts, **Watts et al. (1996)** montre que la force et l'endurance diminuent (respectivement de 22% et 57%) lors d'effort continu de d'escalade (7B) et restent diminuées après 20 minutes de repos. Ces diminutions sont directement corrélées avec la durée de l'effort et avec le nombre d'essais. Il est aussi montré que les sujets récupèrent plus vite la force que l'endurance. Toujours en rapport avec cette récupération **Watts et al. (2000)** montre une diminution du temps de récupération de dix minutes grâce à la récupération active (cyclo-ergomètre à 25W) après une voie de 7B/7B+.

7 Les types de préhension

D'après **Holtzhausen et al. (1996)** la plupart des lésions sont spécifiques de la préhension utilisée par le grimpeur. Il serait évidemment impossible de décrire l'ensemble des préhensions utilisées tant leur variété est importante mais il est cependant possible de classer celles-ci en plusieurs catégories plus générales. Plusieurs auteurs (48,63,70,71,73) décrivent les différentes préhensions représentées ci-dessous :

7.1 La prise en arquée, « *crimp grip* », ou « *cling grip* » position :

Il s'agit de la préhension qui fait l'objet de la plupart des études portant sur les lésions de poulies (Fig 21). Dans cette position l'interphalangienne proximale (IPP) est en flexion majeure et l'interphalangienne distale (IPD) en hyperextension avec une métacarpo-phalangienne (MCP) en légère flexion ou légère extension. Elle donne une sensation de force et de stabilité sur de petites prises.

Pequignot et al. (1989) parle ici de verrouillage de l'IPP par le système des bandelettes latérales et rétinaculaires se luxant en palmaire du fait d'un étirement passif du système extenseur long des doigts amenant un silence EMG dans cette position .

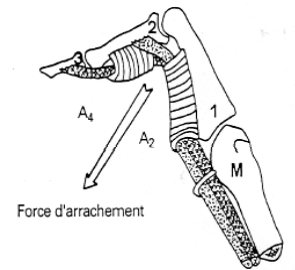
Elle est souvent utilisée du fait qu'elle permet au poignet d'être en extension et donc d'augmenter l'efficacité des fléchisseurs des doigts (99).

Jebson et al. (1997) la décrit comme la plus douloureuse et la plus pathogène.

Figure 21 : La position arquée



D'après **Schweizer (2001)**



D'après **Parzy (2003)**

7.2 La prise en main ouverte ou « en crochet » :

IPP et IPD fléchies (60° et 30°), cette préhension est utilisée pour les prises plus larges (Fig 22).

7.3 La prise en poche:

Utilisée pour les trous en bi- ou en mono-doigts ; IPD en flexion et IPP en extension (Fig 23) ;

Figure 22 : La position en main ouverte



D'après **Peters (2001)**

Figure 23 : La prise en poche



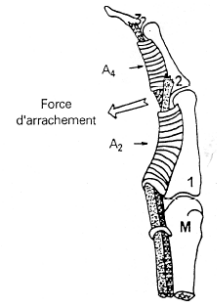
7.4 La prise tendue :

IPP en extension et IPD en flexion avec une adhérence pulpaire maximale (Fig 24).

Les deux fléchisseurs sont recrutés ainsi que l'extenseur, dans une action de synergie-antagoniste. Les contraintes sur les poulies sont moindres et réparties de façon plus

homogène qu'en position arquée. L'angle très ouvert sur l'IPP est défavorable à l'action du FCS (70).

Figure 24 : La prise tendue



D'après **Parzy (2003)**

7.5 La pince :

Utilisation importante du pouce en opposition avec un ou plusieurs autre(s) doigts.

7.6 Les fissures,

7.7 Les trous ,...

En plus de ces positions de doigts, **Peters (2001)** décrit aussi une position de base du membre supérieur en escalade avec l'avant bras en pronation, le poignet en extension et en légère inclinaison cubitale, et les doigts fléchis. Cette position du poignet correspond à ce que de nombreux auteurs appellent la *position de fonction du poignet*, elle correspond à la position dans laquelle l'efficacité des fléchisseurs des doigts est maximale.

Lors du mouvement permettant d'aller chercher la prise suivante le coude est fléchi essentiellement par les muscles biceps brachial et brachial antérieur alors que l'avant bras est en pronation. Le triceps brachial joue alors un rôle d'antagoniste stabilisateur de l'articulation du coude (Fig 25).

Figure 25 : Position de base du membre supérieur en escalade



Pequignot et al. (1989) relève une fréquence d'apparition des lésions de 42% pour la position arquée, de 24% pour la « tendue », de 12 % « en crochet » et finalement de 15% en « torsion ».

8 Biomécanique et biodynamique spécifiques à l'escalade

Afin d'essayer d'apporter de nouveaux éléments dans la compréhension de la physiopathologie, nombreux sont les auteurs à s'être intéressés de près à l'aspect dynamique et mécanique de l'escalade. Ces études cherchent à mesurer avec plus ou moins de précision des valeurs de force musculaire développées par les grimpeurs dans des tests visant le plus souvent à reproduire la situation d'escalade. **Koukoubis (1995)**, montre chez des grimpeurs une contribution EMG importante du muscle fléchisseur commun superficiel des doigts (FCS) dans un mouvement de traction sur le bout des doigts sans avoir testé le profond (FCP). Cette contribution dépasse celles de muscles puissants tels que le biceps brachial, brachial antérieur ou encore huméro-stylo-radial (HSR). Cette découverte, si elle n'a rien de surprenant, nous montre cependant l'implication de muscles tels que ceux-ci dans des intensités hors normes.

Peters (2001) va plus loin en disant que ces deux muscles (FCP et FCS) sont les principaux facteurs limitant la performance en escalade, autrement dit qu'il s'agit des principaux acteurs dans les différentes préhensions utilisées couramment en escalade, il cite aussi les muscles fléchisseurs du poignet, du coude et de l'épaule comme muscles moteurs principaux. Cependant s'il est vrai qu'il est difficile de décrire la contribution d'un groupe musculaire plus que d'un autre étant donné l'immense variété de mouvements différents apparaissant dans cette pratique **Peters (2001)** établit que le plus fréquemment et dans la plupart de ces mouvements on retrouve une action importante de ces muscles cités ci-dessus.

Il est montré ($P < 0.05$) que des grimpeurs de haut niveau tiennent significativement plus longtemps en position de suspension sur une barre et réalisent un plus grand nombre de tractions que des grimpeurs de niveau moyen ou faible (sans plus de précision par rapport au niveau) (35).

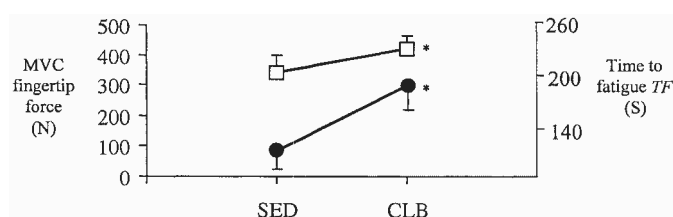
D'autres auteurs ont mis en évidence des capacités de force pure et d'endurance surdéveloppées chez des grimpeurs par rapport à des sédentaires (77), mais aussi par rapport à d'autres sportifs de haut niveau mais pratiquant d'autres disciplines (34). Par exemple **Quaine et al. (2003)**, en testant la force en position arquée des doigts, trouve une force de contraction maximale (MVC)

significativement plus grande ($P < 0.05$) chez des grimpeurs (CLB) de niveau 8A que chez des sédentaires (SED) ($420 \pm 46\text{N}$ contre $342 \pm 56\text{N}$).

De plus, le temps nécessaire pour arriver au temps de fatigue (impossibilité de tenir l'effort entre 70% et 80% de MVC) était significativement plus long chez les grimpeurs (3min et 5 sec contre 1 min et 55 sec ; ou encore 19 répétitions contre 12) (voir fig 26).

A propos de ce taux de fatigue (double chez les SED), **Quaine et al. (2003)** parle de capacités de vasodilatation accrues chez les grimpeurs et donc d'une diminution de l'accumulation des métabolites, engendrant moins de perte dans la vitesse de propagation du potentiel d'action et donc une fréquence EMG plus importante ; d'autres parlent encore *d'endurance spécifique* des muscles de l'avant bras (7).

Figure 26 : Force du bout des doigts max (MVC) (□) et temps de fatigue (●)chez des sédentaires (SED) et des grimpeurs de haut niveau (CLB)



Cette "supériorité" en terme de force musculaire des doigts a aussi été montrée grâce à des tests réalisés sur une machine mesurant la force développée par les doigts en position de simulation d'escalade (34) ; les grimpeurs ($383 \pm 35.6\text{N}$) développant une MVC plus importante que des rameurs ($321 \pm 49.5\text{N}$) ou que des sujets entraînés en aérobie au niveau des jambes ($288 \pm 60.6\text{N}$, $P=0.001$).

Au sein même de la main, on a montré que la répartition des forces appliquées au bout des doigts n'était pas prise en charge de façon homogène par tous les doigts, en effet les résultats de cette étude montrent clairement que la force la plus importante est développée par le majeur (20.8N), quelle que soit la position. L'auteur parle aussi d'une implication de 105% de l'annulaire en position "incurvée" (76). En conclusion les grandes forces qui leur sont appliquées semblent être les facteurs principaux d'exposition aux lésions de ces deux doigts (voir traumatologie spécifique).

Toujours en relation avec ces forces importantes exercées sur les 3^{ème} et 4^{ème} doigts, **Schweizer et al. (2003)** parle, de façon tout à fait étonnante, d'analogie avec certaines espèces de chauves souris et d'oiseaux chez lesquelles les phénomènes de friction sont si importants que les muscles fléchisseurs sont complètement inactifs notamment au cours de mouvements de suspension nocturnes, ou encore même des périodes d'hibernation. Ce système s'apparenterait à un système de verrouillage passif du tendon contre les poulies digitales.

On décrit ce phénomène sous le nom de **TLM** (Tendon Compressing Mechanism), il consisterait en une compression circulaire du tendon par le chiasma du tendon et par la poulie A2 favorisant les frictions en mode statique ou isométrique (changement d'orientation des fibres).

Les importantes différences "excentrique-concentrique" obtenues dans le test de force des fléchisseurs au travers des IPP montre que les frictions y sont plus importantes. Ces phénomènes de friction sont donc importants dans le rôle biomécanique qu'ils occupent, notamment dans les prises de force avec la main. On en conclut donc que ces phénomènes de friction sont avantageux pour le grimpeur dans le sens où ils aident l'effort musculaire des muscles fléchisseurs des doigts mais d'un autre côté ils augmentent les risques de lésions au niveau de ces poulies digitales.

9 Traumatologie spécifique

De nombreuses études, plus ou moins récentes, se sont attardées sur la question des pathologies associées à la pratique de l'escalade. A ce titre il convient de différencier l'escalade d'autres sports auxquels on l'apparente souvent comme l'alpinisme en haute montagne, le trekking, les cascades de glace et autres activités du même ordre. En effet l'analyse de la littérature à ce sujet montre une réelle différence à la fois dans la pratique de celles-ci mais aussi et surtout dans les pathologies spécifiques qui leur sont associées .

Certaines études (2,16,103), souvent plus anciennes, décrivent essentiellement des mécanismes lésionnels liés aux chutes et aux mauvaises utilisations du matériel de sécurité (brûlures des doigts avec les cordes,...), aux conditions météorologiques (gelures digitales,...), ou encore aux effets de l'altitude (95). Il semble à l'heure actuelle important de bien scinder ces activités et leur lésions spécifiques car comme le souligne **Bollen (1990)**, l'amélioration des techniques de sécurité et la qualité de l'équipement expliquent que les vieux problèmes de fractures osseuses liées aux chutes, de gelures ou autres ont été remplacés par une nouvelle batterie de lésions des tissus mous plus spécifiques.

La plupart de ces lésions intéressent le membre supérieur (43,55,69,73,79,80,81,90) et ce suivant différents pourcentages variables suivants les auteurs (voir tableau 5)

Tableau 5 : Fréquences topographiques des lésions

	MS	MI	Doigts	Mains- poignets	Coude	Epaule	Dos, genoux
Largiarder, 1993	90,30%	/	/	/	/	/	/
Rooks, 1995	/	/	/	50%	/	/	/
Rooks, 1997	/	/	/	60%	40%		/
Rohrbough et al., 2000	100%	/	/	63%	37%		/
Stelzel et al., 2000	/	/	69.7%		10%	/	3,90%
Peters, 2001	66,60%	33,30%	/	/	/	/	/
Wright et al., 2001	/	/	32%	/	/	/	Faible (non chiffré)
Doran et al., (?)	82,50%	/	24,20%	40,50%	11,90%	15,90%	/

Vu sous un autre angle on cite différents pourcentages de grimpeurs comme ayant déjà été sujet à un problème spécifique, ceux-ci varient en fonction des séries et des auteurs (voir tableau 6).

Tableau 6 : Fréquence individuelles des lésions

	% de grimpeurs ayant déjà été blessés
Della Santa et al., 1990	25%
Shea et al., 1992	75%
Largiarder et al.,1993	34,40%
Rooks et al., 1995	89%
Wright et al., 2001	44%
Doran et al., (?)	48%

Ces différentes lésions spécifiques nombreuses sont reprises dans les tableaux 7, 8 et 9 avec leurs fréquences d'apparition respectives dans la littérature médicale.

Tableau 7 : Fréquence d'apparition des lésions des tissus mous dues à la pratique d'escalade dans la littérature

Lésions des tissus mous	Etudes (n)	Etudes (%)
Atteinte des tendons fléchisseurs des doigts (globalement)	12	33.33%
Atteintes plus spécifiques de la poulie A2	11	30.5%
Atteintes des poulies digitales	9	25%
Lésions des tendons fléchisseurs	6	16.7%
Tendinites et ténosynovites des fléchisseurs	6	16.7%
Lésions ligts collat. et/ou capsule des IPP et IPD	6	16.7%
Epicondylopathies	4	11.1%
Epirochléopathies	4	11.1%
Lésion du biceps brachial ou du brachial antérieur	4	11.1%
Elongation de la jonction musculo-tendineuse	3	8.3%
Elongation de l'unité fléchissante	2	5.5%
Déchirure de la gaine du tendon fléchisseur	2	5.5%
Nodules tendineux des fléchisseurs des doigts	2	5.5%
Atteintes spécifiques de A4	1	2.8%
Atteintes spécifiques de A3	1	2.8%
Lésion du ligament collatéral interne du coude	1	2.8%
Tendinopathies d'épaule	1	2.8%
Conflits d'épaule	1	2.8%
Entorses des doigts	1	2.8%
Hernies synoviales digitales	1	2.8%
Lésions des tendons extenseurs des doigts	1	2.8%
Lésions du ligament annulaire de l'annulaire	1	2.8%

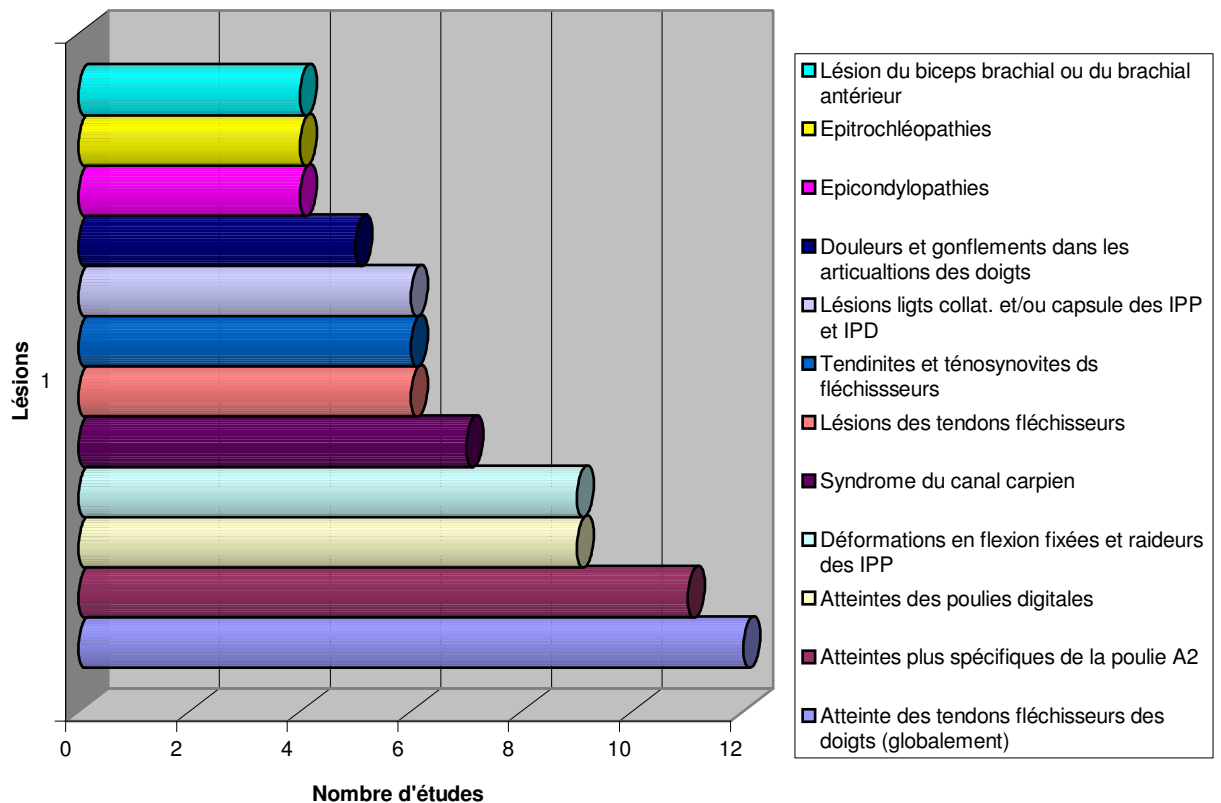
Tableau 8 : Fréquence d'apparition des lésions osseuses et ostéo-articulaires dues à la pratique d'escalade dans la littérature.

Lésions osseuses et ostéo-articulaires	Etudes (n)	Etudes (%)
Déformations en flexion fixées et raideurs des IPP	9	25%
Douleurs et gonflements dans les articulations des doigts	5	13.9%
Problèmes de pieds ou de cheville	3	8.3%
Problèmes de genoux	3	8.3%
Douleurs de dos	1	2.8%
Effusions des articulations interphalangiennes	1	2.8%
Effusions articulaires de la main ou du poignet	1	2.8%
Douleur de MCP pouce et IPD	1	2.8%
Lésion de l'IPD	1	2.8%
Lésion de P1	1	2.8%
Problèmes de nuque de l'assureur	1	2.8%
Fractures phalang., carp., scaphoïd., lunar.	1	2.8%
Hyperostose de P2 et P4	1	2.8%
Géodes sous chondrales de l'IPP	1	2.8%
Spicules osseux des crêtes latéro-palmaires de P1	1	2.8%
Lésion du poignet	1	2.8%
Kystes ganglionnaires du poignet	1	2.8%
Kystes sous-chondraux au niveau des mains	1	2.8%
Déchirures du ligament annulaire de l'annulaire	1	2.8%
Ostéophytes ou éperons osseux au niveau des mains	1	2.8%
Arthrose franche au niveau des mains	1	2.8%

Tableau 9 : Fréquence d'apparition des lésions osseuses et ostéo-articulaires dues à la pratique d'escalade dans la littérature.

Lésions nerveuses, cutanées et vasculaires	Etudes (n)	Etudes (%)
Syndrome du canal carpien	7	19.4%
Compressions au niveau des nerfs du membre supérieur	2	5.5%
Compressions nerveuses au niveau des pieds	2	5.5%
Syndromes spinaux	2	5.5%
Lésions cutanées chez des débutants	2	5.5%
Syndrome de Raynaud	1	2.8%
Troubles sensitifs pulpaux et palmaux	1	2.8%
Brûlures, et plaies diverses	1	2.8%
Gelures digitales	1	2.8%
Congestion veineuse	1	2.8%

Graphique 1 : Fréquence d'apparition des lésions les plus fréquentes



Comme on le voit nettement sur ces différents tableaux et graphiques, la main est sans aucune discussion la région la plus souvent touchée, avec des atteintes le plus souvent des tendons fléchisseurs des doigts (41,45,48,55,84,92), des poulies digitales (10,11,16,32,33,43,45,48,63,64,70,71,79,80,87,88,89,92,103) ou encore de la région interphalangienne proximale (IPP) et ce qu'il s'agisse de déformations en flexion et de raideurs (10,11,12,16,42,43,48,55,71,90), ou de déchirures ou élongations des ligaments collatéraux et/ou de la capsule (43,45,48,55,79,81).

9.1 Les lésions tendineuses

Parmi les différentes atteintes tendineuses on retrouve les problèmes de tendinites ou de ténosynovites (16,22,41,48,71,81), d'élongations de la jonction musculo-tendineuse, de nodules tendineux et de « doigt à ressaut » associé (16,48) ou encore de divers problèmes de l'entité que certains appellent l'unité fléchissante du doigt (tendons, gaine, poulies) (79,81). Les problèmes

de nodules tendineux sont souvent cités dans un contexte à antécédents de tendinopathie(s) de surtension du tendon fléchisseur atteint.

Beaucoup plus rares, **Pequignot et al. (1989)** décrit des lésions des tendons extenseurs tels que des arrachements modérés du système extenseur en position arquée ou encore des tendinites d'insertion de l'extenseur commun des doigts sur P2.

Sans parler d'un problème en particulier, bon nombre d'auteurs s'accordent à dire que l'annulaire est le plus fréquemment touché, suivi généralement du majeur et de l'index (10,11,12,24,42,45,48,58,70,99) sauf **Cartier et al. (1985)** qui recense plus de lésions du majeur que de l'annulaire, suivi du pouce et de l'index beaucoup plus rarement.

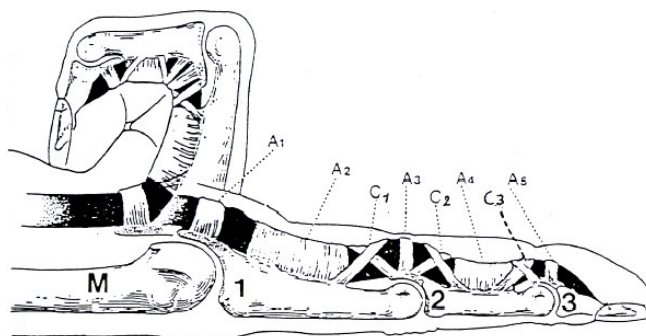
Peu de raisons sont avancées pour expliquer cela si ce n'est l'implication importante de ce doigt dans la répartition des charges.

9.2 Les lésions de poulies

Nombreuses sont les études à s'être attardées sur cette question.

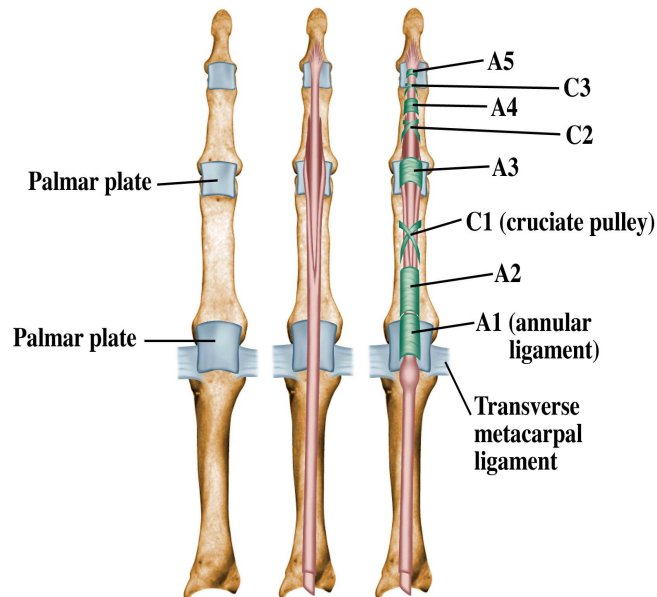
Les poulies digitales sont des bandes fibreuses transversales, disposées le long du canal digital. On distingue cinq poulies annulaires, de A1 à A5, et trois poulies cruciformes, de C1 à C3. (voir figures 27 et 28)

Figure 27 : Les poulies digitales, vue latérale.



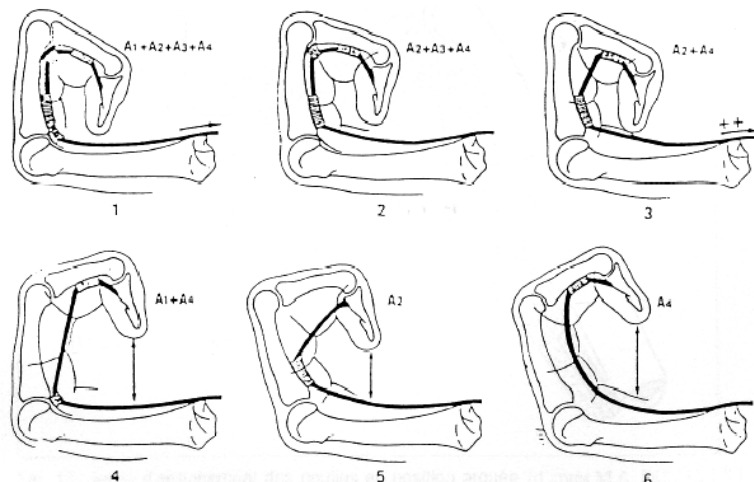
D'après **Doyle (1989)** in **Parzy O. (2003)**

Figure 28 : Les poulies digitales, vue palmaire



Elles maintiennent les tendons fléchisseurs au contact de l'os et évitent le phénomène de la corde à l'arc (« *Bowstringing* ») lors de la flexion du doigt. La poulie A2 et la poulie A4 en sont les plus constantes, les plus larges et les plus importantes pour une bonne flexion digitale. Elles sont aussi les plus sollicitées (et ce d'autant plus lorsque la flexion est importante) et les plus fréquemment lésées car elles ont une insertion fixe sur la diaphyse alors que les autres ont une insertion plus souple sur les plaques palmaires en regard des articulations. Leur rupture mène donc à une perte de force en flexion du doigt et une incapacité de flexion complète.

Figure 29 : Rôle des poulies dans la flexion des doigts.



Schweizer (2001), montre l'importance des contraintes appliquées sur la poulie A2 dans la position arquée et retrouve une charge de 120N sur le bord inférieur de A2 à 25% de la force maximale de flexion des doigts.

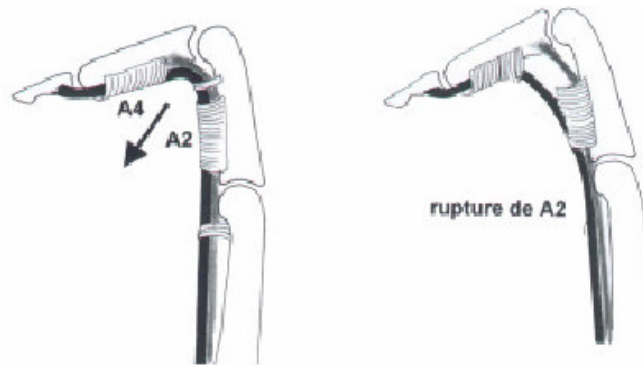
Il établit aussi une relation linéaire entre la charge appliquée sur le bout du doigt et la charge appliquée sur la poulie A2. En extrapolant, l'auteur suppose une force de près de 40 kgs sur la poulie A2 pour une force maximale exercée sur le bout du doigt par un grimpeur moyen. (118N). En terme de prévention, il préconise un échauffement d'au moins 100 mouvements (50 pour chaque main) pour préparer les poulies à des charges importantes. Il montre une augmentation de 30% du phénomène de corde à l'arc (distance « tendon-phalange », distance T-P) après échauffement mais aussi une augmentation minimale mais théorique de 3% du BDL du FDP et donc de son efficacité.

Plusieurs auteurs ont tenté d'approfondir les connaissances sur la physiopathologie de ces lésions in vitro chez des cadavres relativement jeunes (20-47ans) (99), et d'autres plus âgés (61-84 ans) (58). Il en ressort que l'ordre de rupture des différentes poulies au décours d'une mise en tension progressive est différent d'une série à l'autre avec cependant une rupture systématique des poulies cruciformes préférentiellement aux annulaires. Les poulies les plus fréquemment touchées sont A2 et A4 (parfois A3), et sont très rarement évoquées les ruptures de A1 et de A5. Plusieurs auteurs s'accordent enfin à dire que les doigts les plus fréquemment touchés sont respectivement l'annulaire, le majeur et enfin l'index (10,11,12,16,24,42,45,58,70,99), et que les mécanismes lésionnels les plus fréquemment décrits sont soit une position arquée sur un ou deux doigts dans un mur déversant avec un pied qui glisse brutalement en créant subitement une surcharge importante sur la poulie A2, soit un mouvement dynamique entre deux prises de mains (16,73,99), l'accident est souvent accompagné d'une douleur vive et d'un claquement sonore net parfois audible par l'assureur en bas.

En terme de symptomatologie, nombreux sont les auteurs à parler d'apparition de prise de corde à l'arc du tendon fléchisseur commun profond (Fig 30) et d'une limitation de la flexion du doigt touché, même si **Marco et al. (1998)** montre cependant, in vitro, qu'un phénomène de corde à l'arc du FDP n'est apparent qu'après rupture d'au moins deux poulies, et qu'il faut une rupture des 3 poulies pour qu'il soit évident.

Encore dans cette étude, une rupture isolée de A2 ou de A4 ne résultait jamais en l'apparition de « *bowstringing* ».

Figure 30 : Phénomène de corde d'arc du FDP sur rupture de A2



D'après **Parzy (2003)**

Enfin, en matière d'imagerie, plusieurs parlent de la résonance magnétique (RMN) comme examen de choix dans la recherche d'une éventuelle lésion de poulie ou d'une autre anomalie de surtension au niveau de la main ou du poignet (32,33,41), alors que pour **Moutet et al. (1998)** le scanner réalisé bilatéralement est le meilleur moyen d'investigation préférentiellement à la RMN pour ces mêmes atteintes.

L'échographie montre cependant une sensibilité de 98% et une spécificité de 100% pour le diagnostic de ces lésions (53,70).

9.3 Les lésions ligamentaires, articulaires et osseuses

Parmi les différentes lésions existantes, les lésions localisées au niveau de la première phalange sont les plus fréquentes (55,90), qu'il s'agisse de raideurs articulaires de l'IPP (16,48), de douleurs et de gonflements (42,71,92), de lésions du ligament collatéral (16,43,48,55,71,79,81) ou encore de déformations en flexion (10,11,12,43,48,71). L'ensemble de ces lésions semble dû à des phénomènes de surmenage et parfois mais plus rarement à des phénomènes de coincements de doigts dans une prise.

Cartier et al. (1985) cite encore dans une étude assez ancienne des lésions d'entorses de la MCP du pouce, des interphalangiennes, et des problèmes de doigts en maillet.

Pequignot et al. (1989) parle aussi de nombreuses variétés de lésions intra- et extra- articulaires des doigts et de la main telles qu'effusions articulaires, hernies synoviales ou autres lésions associées ou non à des signes radiographiques spécifiques.

Ces signes sont généralement décrits comme de l'hyperostose de P2 et P4 par sur-sollicitations du système extenseur, des géodes sous chondrales de l'IPP par hyperpressions répétées et enfin des spicules osseux au niveau des crêtes latéro-palmaires de P1 signant un surmenage sur les

insertions des poulies fibreuses. **Bollen et al. (1994)**, rapporte des kystes sous-chondraux beaucoup plus fréquents chez les grimpeurs, des ostéophytes ou éperons osseux et aussi quelques cas rares d'arthrose franche. Son étude montre aussi une épaisseur corticale de P1 et P2 significativement plus grande chez les mains des grimpeurs.

Enfin quelques auteurs comme **Cartier et al. (1985)** décrivent divers mécanismes de fractures osseuses non abordés ici car ces lésions ne semblent plus réellement spécifiques de la pratique de ce sport comme le suggère aussi **Bollen (1990)**.

9.4 Autres lésions musculaires

On recense aussi plusieurs sites musculaires fréquemment touchés chez les grimpeurs.

Plusieurs parlent d'épitrôchléopathies (10,11,12,43,45,79) au sens large, d'autres (10,11,12,79,84,92) citent de nombreux cas d'épicondylopathies, jusqu'à dans 9.5% des cas pour **Stelzle et al. (2000)**.

Des atteintes des muscles biceps brachial et brachial antérieur sont aussi citées (10,11,12,43,45) et expliquées pour **Humphries (1998)** par des gestes de type traversées avec l'avant bras en pronation et supportant le poids de tout le corps.

Enfin quelques auteurs parlent de problèmes d'épaule tels que problèmes de conflits (10,11,12), ou tendinopathies sans plus de précisions (45).

9.5 Les atteintes nerveuses

Très nombreuses sont les études (41,43,45,48,56,79,80) à rapporter des problèmes de syndrome de canal carpien chez le grimpeur suite à des mouvements de flexion soutenues (48), ou d'hyperextension du poignet ou d'inflammation ou de gonflement des muscles fléchisseurs des doigts (73).

Mis à part ces problèmes fréquents, plusieurs auteurs citent des phénomènes de compressions nerveuses à la fois dans le membre supérieur et dans le membre inférieur.

Peters (2001) démontre l'existence de compressions :

- Du nerf médian **soit** au niveau du canal carpien (le plus fréquent) **soit** au niveau de son passage entre les deux chefs du rond pronateur (risques lors de tractions sur les bras, ou d'inflammation du muscle pour une autre raison).

- Du nerf ulnaire **soit** au niveau du coude et du passage entre les deux chefs du FCU (cubital antérieur) (mouvements puissants de flexion du coude lors de suspensions sans les pieds ou autre pouvant engendrer divers phénomènes inflammatoires puis cicatriciels compressifs) **soit** au niveau du canal de Guyon lors de mouvements d'hyperflexion du poignet et de tractions puissantes sur les bras.
- Du nerf radial lors de phénomènes inflammatoires du muscle huméro-stylo-radial ou d'autres muscles du plan des supinateurs.

Il parle aussi de compressions de nerfs du membre inférieur tels que les deux nerfs plantaires interne et externe au niveau de l'interligne de Lisfranc à cause des chaussons et de la mise en hyperflexion de tout l'avant pied dans les chaussons d'escalade, et de collatérales du nerf tibial antérieur par simple phénomène compressif dû au chausson.

I. CHOIX DES POPULATIONS ETUDIEES

Afin de pouvoir déterminer si l'escalade engendre des perturbations sur le membre supérieur et plus particulièrement la main et le poignet, il convient tout d'abord de choisir deux échantillons représentatifs de la population « normale » et de la population pratiquant l'escalade pour ensuite faire des mesures identiques dans les deux de différents paramètres et enfin les comparer objectivement.

Pour cela, deux groupes seront constitués : un **groupe expérimental** composé de sujets masculins pratiquant l'escalade assez souvent et à un niveau relativement élevé, et un **groupe contrôle** constitué de sujets masculins de même tranche d'âge ne pratiquant pas ce sport.

Pour constituer ce échantillon expérimental une lettre et un formulaire ont été envoyés dans de nombreuses salles d'escalade de Belgique afin d'essayer de recruter un maximum de grimpeurs sujets à participer à cette étude, quant aux sujets de la population contrôle il s'agissait essentiellement d'étudiants en kinésithérapie ou d'autres personnes appartenant au personnel hospitalier du lieu d'expérimentation.

1 Caractéristiques des deux populations

1.1 Groupe contrôle (n=11)

- 6 d'entre eux (54%) ne pratiquent aucun sport de façon régulière, 3 pratiquent au maximum une fois par semaine un sport sollicitant le poignet (volleyball, tennis) et 3 pratiquent régulièrement un sport ne faisant pas intervenir le poignet (football, athlétisme)
- 10 d'entre eux (90.9%) déclarent avoir une activité professionnelle moyennement manuelle
- 10 d'entre eux (90.9%) sont droitiers

1.2 Groupe expérimental (n=9)

- 3 (33%) déclarent avoir une activité professionnelle moyennement manuelle, 3 (33%) très manuelle, et 3 (33%) peu manuelle
- 7 d'entre eux (77.7%) sont droitiers

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

1 Succession des évènements

Echauffement → Epreuve isocinétique du poignet → Test de force de préhension de la main
→ Réponse au questionnaire distribué

2 Echauffement

L'échauffement, préconisé par **Poullis et al (2003)** et **Forthomme et al. (2002)**, consistera à préparer la musculature du poignet à l'épreuve isocinétique, mais aussi à assouplir les articulations du poignet avant l'exercice.

Il sera standardisé chez tous les sujets à la fois du groupe contrôle et du groupe expérimental.

Il consistera en :

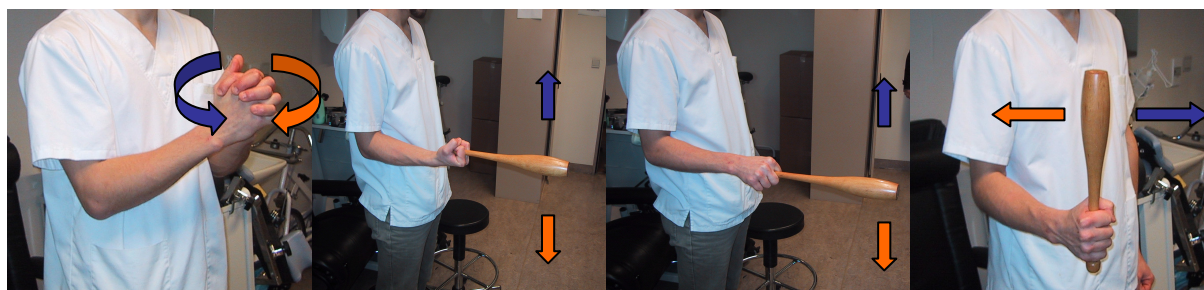
- une série de 50 mouvements de circumduction des deux poignets simultanément en croisant les doigts de chaque main, dans un sens et puis dans l'autre (Fig 31).
- une série de 15 mouvements de flexion-extension du poignet avec l'avant bras en position de supination (Fig 32).
- une série de 15 mouvements de flexion-extension du poignet avec l'avant bras en position de pronation (Fig 33).
- une série de 20 mouvements de pro-supination du coude amenant un effet assouplissant sur les articulations du poignet (Fig 34).

Figure 31

Figure 32

Figure 33

Figure 34



Ce protocole d'échauffement sera réalisé des deux côtés sans déterminer le premier côté à échauffer.

3 Epreuve isocinétique

3.1 Matériel employé – Utilisation.

L'évaluation isocinétique a pu être possible grâce à la machine **Biodex™ System 3 Pro**.

Cette machine permet à la fois la rééducation et l'évaluation isocinétiques de tous les groupes musculaires croisant les articulations les plus importantes (hanche, genou, cheville, rachis, épaule, coude, et poignet).

De nombreux protocoles existent déjà, et ce pour toutes les articulations prévues, mais nous choisirons de personnaliser nous-mêmes les différents protocoles utilisés dans cette étude ; toutefois nous conserverons la position proposée initialement par la firme **Biodex™** (Figures 35 et 36) pour le testing isocinétique de la flexion extension du poignet, à savoir la position décrite ci-dessous :

Figures 35 et 36 : Position de test isocinétique

- Sujet assis, hanches fléchies à 90°
- Epaule en adduction contre le tronc
- Coude en flexion de 90°
- Pronation maximale de l'avant-bras
- Mise en alignement des axes articulaire et dynamométrique



3.2 Protocole expérimental de l'épreuve isocinétique

Chaque épreuve isocinétique est divisée en trois tests bien distincts (concentrique, excentrique et isométrique) réalisés, bilatéralement, pour chaque sujet des deux groupes.

Chacun de ces tests nécessite la succession d'évènements suivants :

- Enregistrement des particularités du patient (ne doit pas être répété)
Nom, prénom, âge, taille (cm), masse (kgs), date de naissance et latéralité (G/D).
- Installation du patient et explications relatives au déroulement
- Prise des amplitudes de mouvement propres au patient en flexion et en extension
- Mise au point du « 0 » de l'amplitude de FEM
- Correction de la pesanteur
Cette correction se fait par une pesée de la main réalisée par l'appareil en position d'extension de poignet ($\pm 45^\circ$) ; il est demandé au patient de se relâcher complètement pour s'assurer que seule la masse de la main est prise en compte ; cette correction de la pesanteur empêche son effet positif sur les fléchisseurs et son effet négatif sur les extenseurs.
- Séance d'essai permettant la compréhension du mouvement
- Test à proprement parler

3.2.1 Test concentrique AGO/ANTAG - CON/CON

3 répétitions d'un aller retour agoniste/antagoniste en mode concentrique dans les deux sens. Le test commence par une contraction des fléchisseurs et s'effectue en continu sans temps de repos entre les contractions jusqu'à la fin de la série.

3.2.2 Test excentrique AGO/ANTAG - ECC/ECC

3 répétitions d'un aller retour agoniste/antagoniste en mode excentrique dans les deux sens. Le test commence pour les extenseurs et s'effectue en continu sans temps de repos entre les contractions. La machine ne déclenche la poussée qu'après un « à coup » dans le sens opposé de la part du sujet.

3.2.3 Test isométrique AGO/ANTAG - ISOM/ISOM

3 répétitions d'un cycle agoniste/antagoniste en isométrique. Le test s'effectue dans une position de 45° d'extension du poignet à la fois pour la mesure de la force d'extension et pour la mesure de la force de flexion.

Chaque phase de contraction musculaire dure 7 secondes et est immédiatement suivie d'une phase de repos de 14 secondes à laquelle succède une phase de contraction de 7 secondes des muscles antagonistes, etc...etc.

Chacun de ces tests est réalisé bilatéralement de la manière suivante :

- Sujet assis face à l'écran, on commence par un test du côté gauche en concentrique suivant les modalités vues ci-dessus, ensuite :
- Dos à l'écran (on retourne le sujet), on teste le poignet droit en concentrique, ensuite :
- Le sujet reste dos à l'écran et on passe au mode excentrique en commençant par le côté droit,....etc....etc.

En terme de chronologie, on retrouve le schéma suivant pour chaque sujet :

P.G. CON → P.D. CON → P.D. ECC → P.G. ECC → P.G. ISOM → P.D. ISOM

P, poignet ; G, gauche ; D, droit ; CON, concentrique ; ECC, excentrique

3.3 Choix des vitesses

Les deux tests concentrique et excentrique seront réalisés avec une vitesse angulaire constante de 60°/seconde, en effet nombreux sont les travaux ayant montré une meilleure fiabilité dans des vitesses faibles. De plus **Forthomme et al. (2002)** montre l'importance du bon compromis dans le choix des vitesses d'évaluation entre les vitesses très (trop) lentes (<30°/s) inconfortables et les vitesses trop rapides ne permettant pas des conditions de bonne réalisation de test en terme de reproductibilité. Comme nous le dirons plus tard, il a été prouvé que des vitesses de l'ordre de 0°/s, 60°/s et 120°/s offrent de bons résultats en matière de reproductibilité.

3.4 Précautions visant à augmenter la reproductibilité des mesures

D'après **Bouilland et al. (2001)** plusieurs facteurs essentiellement techniques influencent directement la reproductibilité des mesures.

Plusieurs précautions seront donc prises pour essayer d'augmenter au maximum cette reproductibilité ; notamment s'assurer que la position soit la même pour chaque patient, que le respect d'alignement des axes soit bon, qu'il n'y ait pas de compensations possibles, que le temps d'apprentissage du mouvement soit le même pour tous les sujets, que le feedback visuel et les encouragements soient les mêmes d'un sujet à l'autre, que la vitesse de test ne soit pas excessive, que l'examineur soit toujours le même, que l'appareil soit toujours le même et que les tests soient toujours identiques.

3.5 Choix des paramètres interprétés

3.5.1 Le peak torque (PT) :

Les valeurs de PT dans l'absolu seront intéressantes mais à interpréter avec prudence dans le sens où elles seront sous l'influence des caractéristiques morphologiques spécifiques à chacun et donc moins intéressantes à titre comparatif que les valeurs relatives à la masse corporelle. Cette remarque est aussi valable pour d'autres paramètres tels que le travail en valeur absolue.

3.5.2 Le peak torque relatif (PT/BW):

Cette valeur aura pour avantage le fait de pouvoir être comparable entre les sujets du fait qu'elle est ramenée par unité de masse.

3.5.3 Le travail maximum (W) :

Le travail fourni représentera la totalité de l'effort, il est généralement corrélé avec le PT.

3.5.4 Le rapport agoniste/antagoniste (extenseurs/fléchisseurs dans ce cas) (RAA):

Nous rechercherons en nous intéressant à ce paramètre à mettre en évidence une éventuelle différence pouvant mettre en avant un déséquilibre dans la balance agoniste/antagoniste éventuellement responsable de problèmes spécifiques.

3.5.5 La comparaison bilatérale :

Elle permettra de déterminer les différences entre côté dominant (D) et côté non dominant (ND) et donc les éventuels effets de la latéralité.

3.5.6 Les coefficients de variations (CV):

C'est grâce à leurs valeurs que pourra être appréciée la reproductibilité des différentes mesures effectuées.

4 Test de force de préhension de la main (ou GS, *grip strength*)

4.1 Matériel utilisé

Le dynamomètre utilisé est un dynamomètre **Baseline™** (voir fig 37 et 38), consistant en une pince hydraulique mesurant la force de préhension globale de la main (GS). Le dynamomètre le plus souvent utilisé dans la littérature étant le **Jamar™**, il est important de signaler que **Mathiowetz et al. (1985)** a montré que les résultats obtenus via le dynamomètre **Baseline™** étaient tout à fait comparables avec les résultats de la littérature obtenus avec le **Jamar™**.

Le dynamomètre comporte un cadran muni de deux aiguilles ; une monte progressivement au cours de l'exercice et redescend dès que la pression est relâchée (noire), alors que l'autre est emmenée par la première et reste en position de valeur maximale une fois l'effort terminé (rouge).

Figure 37 : Vue de face



Figure 38 : Vue de profil



L'utilisation de ce type de matériel se justifie de par les différents travaux en ayant montré une reproductibilité et une précision excellentes.

Tableau 10 : Reproductibilité de l'utilisation de dynamomètres type *Jamar*

Auteur	ICC intra-testeur	ICC inter-testeur
	Kamimura et al., 2001	0.94 - 0.98
Peolsson et al., 2001	0.94 - 0.96	0.98
Stoll et al., 2000	> 0.91	> 0.91

CC*, coefficient de corrélation

4.2 Protocole

Les patients sont installés suivant la position conventionnelle de test adoptée par la "American Society of Hand Therapists" (ASHT).

Il leur est alors demandé une contraction maximale de plus ou moins 5 secondes. Les deux mains sont testées de façon alternative en laissant une minute de repos entre chaque contraction du même côté, le premier côté testé étant choisi par le patient.

Conservation de la valeur moyenne des trois essais, de chaque côté.

4.3 Justification des choix ayant mené à ce protocole

4.3.1 Position du patient:

Il s'agit de la position adoptée par la "American Society of Hand Therapists" (ASHT) recommandée par de nombreux auteurs (31,37,50,59,72,85) :

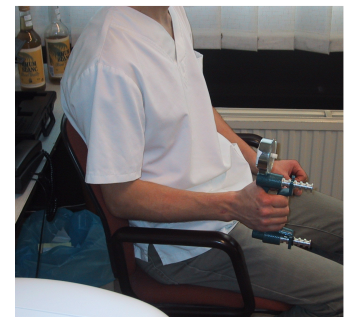
- Sujet assis sur une chaise, pieds à plats sur le sol, avec un soutien dans le bas du dos (dossier)
- Epaule homolatérale en adduction et en position neutre de rotation
- Coude fléchi à 90°
- Avant-bras en position neutre (de pro-supination)
- Poignet entre 0° et 30° d'extension

Figures 39 et 40 : Position de test proposée par l'ASHT

Figure 39 : Vue de face



Figure 40 : Vue de profil



Il semble important de standardiser cette position pour pouvoir comparer les résultats des tests avec ceux trouvés dans la littérature dans cette même situation car les valeurs obtenues dans une autre position sont parfois fondamentalement différentes; en effet, même si **Astin** (citant

Mathiowetz) (1999) parle de différences significatives avec des valeurs de GS plus importantes avec une flexion de 90° du coude, les résultats de **Incel et al. (2002)** montrent des valeurs largement au dessus de la moyenne pour tous les âges en position debout avec le coude en extension et le bras le long du corps, ce qui va aussi dans le sens des résultats de **Su et al. (1994)**, montrant que les valeurs de GS sont systématiquement plus importantes en extension de coude et ce quelle que soit celle de l'épaule (0°, 90°, 180°).

4.3.2 Instructions :

Les instructions seront standardisées, elles consisteront à demander aux sujets de maintenir le coude, le poignet et l'épaule en position pendant toute la durée du test et aussi à informer les sujets du protocole utilisé (à savoir le nombre de répétitions et leur ordre.)

Afin d'éviter les biais d'un sujet à l'autre, les encouragements seront standardisés et ne seront donnés qu'avant la contraction.

4.3.3 Nombre de répétitions :

Un bon nombre d'études ont évalué ce type de mesures de force et il existe beaucoup de différences dans les protocoles d'une étude à l'autre cependant beaucoup d'auteurs réalisent trois mesures de chaque côté (3,37,47) et pour plus de fiabilité **Trossman et al. (1989)** préconise une minute de repos entre chaque contraction d'un même groupe musculaire ; cet intervalle induit une fatigue (7%) moins importante que les intervalles de 15 et 30 secondes (10 et 12% respectivement).

Enfin, le premier côté testé sera choisi au hasard par le patient; encore une fois il existe plusieurs façons de faire différentes dans la littérature mais aucune ne semble vraiment meilleure qu'une autre.

L'effort demandé sera une contraction maximale (« *Pressez la poignée aussi fort que vous le pouvez!* ») pendant plus ou moins 3 secondes ; en effet, l'étude menée par **Kamimura et al. (2001)** comparant deux sessions de test de GS différentes (10 secondes et 6 secondes de contraction) montre que le pic de force apparaît entre les trois premiers dixièmes de seconde et la deuxième seconde, il est donc inutile d'attendre plus longtemps comme le préconise **Mathiowetz et al. (1984)** avec au moins cinq secondes.

La mesure notée sera celle laissée par le dynamomètre à la fin des 3 à 4 secondes de contraction.

Pour des raisons statistiques, nous conserverons la valeur moyenne des trois essais ; en effet cela nous paraît plus représentatif de l'ensemble des répétitions ; là encore il existe plusieurs façons de faire dans la littérature à savoir conserver la meilleure valeur sur trois essais, garder la moyenne arithmétique des trois (47,60), de deux, ou encore garder la première valeur (72).

Hamilton et al. (1994) a testé quatre scores différents (score d'un essai, score moyen de 2 essais, score moyen de trois essais, et meilleur score de 3 essais) et ne montre aucune différence significative en terme de fiabilité, il n'a donc pas été possible de recommander une de ces méthodes comme étant plus précise. Enfin, très récemment, **Haidar et al. (2004)** a évalué et comparé les deux méthodes les plus fréquentes (moyenne de trois valeurs et valeur maximale) ; il montre que les deux méthodes sont excellentes et sans différences significatives entre les deux.

En pratique, **Haidar et al. (2004)** montre que la valeur maximale était atteinte dès la première contraction dans 76% des cas, lors de la deuxième dans 16% et lors de la troisième dans seulement 8%. La main D avait un maximum plus important que le maximum de la main ND dans 64% des cas alors que 12% avaient des valeurs semblables en D et ND.

4.3.4 Position du dynamomètre :

Quelle qu'en soit la marque, les dynamomètres sont souvent réglables sur plusieurs positions de largeur de préhension. Les études réalisées dans ce domaine précisent le plus souvent la position dans laquelle se sont réalisés les tests. Même si certains auteurs mettent en évidence qu'il n'existe pas de différences significatives en terme de fiabilité test-retest (39), la position 2 est souvent préférée aux autres (8,21,29,38,47,50,59) et ce pour des raisons de confort ou de performance en fonction des auteurs.

Hamilton et al. (1994) montre que toutes les positions sont fiables même si la position 5 l'est un peu moins que les autres. **Schreuders et al. (2003)** montre des valeurs de GS systématiquement plus faibles en position 4 qu'en position 2.

Enfin, par notre expérience personnelle, nous avons constaté une meilleure prise de main du dynamomètre dans cette position (position 2) que dans les autres.

4.3.5 Conditions de validité du test :

Les mesures ne seront enregistrées et prises en compte que si aucune erreur n'est survenue au cours des tests de force maximale.

Exemple d'erreur : rotation de l'épaule, flexion de l'épaule, rotation du poignet ou toute autre compensation.

Si le test est raté, celui-ci sera recommencé après un repos de 5 minutes.

5 Réponses aux questionnaires distribués

Afin d'avoir plus d'informations sur les sujets testés dans les deux échantillons, un questionnaire sera distribué à chaque personne ; deux types de questionnaires différents seront donc destinés respectivement à chacun des deux groupes.

En plus des renseignements personnels et morphologiques qu'ils fournissent, ces questionnaires permettront aussi d'apprécier, après une analyse descriptive des réponses, la façon dont ont été perçus les tests isocinétiques par les différentes personnes.

En plus de cela, et uniquement pour le groupe expérimental (groupe grimpeurs), différentes questions plus précises par rapport à la pratique du sport et aux éventuels antécédents traumatologiques seront adressées aux sujets.

Les réponses à ces questions permettront notamment d'évaluer la fréquence des lésions apparaissant chez ces sujets ; nous tenterons enfin d'établir un parallélisme entre les lésions décrites et celles retrouvées dans la littérature sans toutefois, étant donnés les échantillons relativement réduits, tirer de conclusions générales à partir de ces informations.

Ces questionnaires figurent en annexes tels qu'ils ont été distribués aux sujets.

III. RECUEIL ET ANALYSE DES DONNEES

L'analyse statistique des résultats de force de préhension globale (GS) mais aussi de force isocinétique sera réalisée grâce à l'utilisation de deux tests statistiques bien distincts en fonction de leurs indications.

Etant donné les effectifs réduits des échantillons contrôle et expérimental, nous ne pouvons utiliser le « *t* » de Student classiquement employé (test paramétrique ; calculant les valeurs sur base de la moyenne et des écarts types). Nous utiliserons donc des tests non paramétriques (valeurs calculées sur base de la médiane).

Pour les comparaisons entre deux groupes appariés (issus du même échantillon) nous utiliserons le « **T** » de **Wilcoxon**, et pour les comparaisons entre deux groupes indépendants (groupe contrôle et groupe expérimental) nous utiliserons le « **U** » de **Mann-Whitney**.

L'analyse statistique des résultats sera possible grâce à l'utilisation du programme informatique **GraphPad InStat**©.

GC, groupe contrôle; GE, groupe expérimental ou groupe grimpeurs.

1 Recueil et analyse des données isocinétiques

Les données isocinétiques sont issues de rapports types venant du logiciel de l'appareil (un exemple sera donné en annexes) ; toutes les données nécessaires ont été retranscrites dans des tableaux à partir desquels ont pu être établis les calculs de moyenne, d'écarts types et les différentes comparaisons. Nous ne ferons ici qu'énoncer les résultats sans toutefois donner d'interprétations par rapport à ceux-ci ; ces interprétations figureront dans la partie "ANALYSE ET DISCUSSION" ainsi que les tableaux reprenant les valeurs moyennes.

Afin de bien dissocier les principales comparaisons qui seront réalisées au cours de ce recueil de données nous parlerons de comparaisons au sein d'un même échantillon et de comparaisons entre les deux échantillons.

1.1 Comparaisons des valeurs d'un même paramètre pour les deux groupes musculaires

Valeurs de PT et de PT/BW des fléchisseurs supérieures aux valeurs des extenseurs en modes concentrique et isométrique, bilatéralement dans les deux groupes de sujets testés (résultats très significatifs dans le groupe grimpeurs et extrêmement significatifs dans le groupe contrôle).

Aucune différence statistiquement significative entre les valeurs de PT de ces deux groupes musculaires en excentrique.

Valeurs de travail plus importantes pour les fléchisseurs dans les deux groupes en mode concentrique (résultats extrêmement significatifs) sans apparaître en excentrique ; en effet, on ne retrouve cette situation que dans un cas sur les quatre à savoir du côté D dans le GC où le travail des fléchisseurs est supérieur au travail des extenseurs (très significatif).

1.2 Comparaisons au sein d'un même échantillon

Ces comparaisons auront pour but de comparer soit les deux côtés D et ND pour un même paramètre (PT, CV, W...), soit le même côté et le même groupe musculaire mais dans des modes de contraction différents (fléchisseurs en concentrique et en excentrique,...)

Comparaisons effectuées grâce au « T » de Wilcoxon.

GE groupe expérimental ou groupe grimpeurs, **GC** groupe contrôle.

1.2.1 Comparaisons entre les deux côtés D et ND pour un même paramètre

1.2.1.1 Peak torque (PT)

GE: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E, I) et quelque soit le groupe musculaire testé (extenseurs et fléchisseurs).

GC: Valeurs de PT des extenseurs en concentrique supérieures du côté D par rapport au ND ($p=0,0068$, très significatif). Pour le reste il n'existe aucune autre différence statistiquement significative.

1.2.1.2 Peak torque relatif (PT/BW)

GE: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E, I) et quelque soit le groupe musculaire testé (extenseurs et fléchisseurs).

GC: Valeurs de PT/BW des extenseurs en concentrique supérieures du côté D par rapport au ND ($p=0,0068$, très significatif). Pour le reste il n'existe aucune autre différence statistiquement significative.

1.2.1.3 Travail total (W)

GE: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E) et quelque soit le groupe musculaire testé (extenseurs et fléchisseurs).

GC: Valeurs de W des extenseurs supérieures en concentrique du côté ND. Par ailleurs il n'existe aucune différences statistiquement significatives entre les deux côtés dans les autres modes de contraction musculaire.

1.2.1.4 Coefficient de variation (CV)

GE: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E, I) et quelque soit le groupe musculaire testé (extenseurs et fléchisseurs).

GC: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E, I) et quelque soit le groupe musculaire testé (extenseurs et fléchisseurs).

1.2.1.5 Ratio agoniste/antagoniste (RAA)

GE: Aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, quelque soit le mode de contraction (C, E, I).

GC: Aucune différences statistiquement significatives entre les deux côtés D et ND, en excentrique et en isométrique ; toutefois pour le mode concentrique les valeurs D sont supérieures aux ND mais les différences ne sont pas vraiment significatives, il est donc impossible de tirer une information objective de ce résultat.

1.2.2 Comparaisons d'un même côté et d'un même groupe musculaire dans différents modes de contraction

1.2.2.1 Peak torque (PT)

GE: Valeurs de PT plus importantes en excentrique qu'en concentrique sauf pour les fléchisseurs du côté dominant (résultats significatifs à très significatifs).

Aucune différence statistiquement significative entre les PT développés en concentrique et en isométrique.

Enfin les valeurs de PT des extenseurs sont supérieures en excentrique par rapport à l'isométrique bilatéralement (résultats significatifs et très significatifs), ce qui ne se vérifie pas statistiquement pour les fléchisseurs.

GC: Valeurs de PT obtenues toujours plus élevées en excentrique qu'en concentrique et qu'en isométrique, pour un même groupe musculaire testé, bilatéralement (résultats significatifs à extrêmement significatifs).

Pas de différences statistiquement significatives entre les valeurs concentriques et isométriques sauf pour les extenseurs du côté ND plus forts en isométrique qu'en concentrique (résultat très significatif).

1.2.2.2 Peak torque relatif (PT/BW)

GE: Valeurs de PT/BW plus importantes en excentrique qu'en concentrique uniquement pour les extenseurs du poignet des deux côtés (résultats significatifs et très significatifs).

Pas de différences entre les valeurs concentriques et isométriques sauf pour les fléchisseurs du côté ND dont la force concentrique est supérieure à la force isométrique (significatif).

Enfin, les valeurs de PT/BW sont plus importantes en excentrique qu'en isométrique sauf pour les fléchisseurs du côté D où les différences ne sont pas significatives.

GC: Mesures de PT/BW statistiquement plus importantes en excentrique qu'en concentrique et qu'en isométrique, pour un même groupe musculaire testé, bilatéralement (résultats très significatifs à extrêmement significatifs).

A nouveau, pas de différences statistiquement significatives entre les valeurs concentriques et isométriques sauf pour les extenseurs du côté ND plus forts en isométrique qu'en concentrique (résultat très significatif).

1.2.2.3 Travail total (W)

GE: Pas de différences significatives entre les valeurs de W en concentrique et en excentrique sauf pour les fléchisseurs du côté D donnant des valeurs significativement plus importantes en concentrique.

GC: Pas de différences statistiquement significatives entre les valeurs de W en concentrique et en excentrique sauf pour les extenseurs du côté D donnant des valeurs plus importantes en excentrique (très significatif).

1.2.2.4 Coefficient de variation (CV)

GE: Pas de différences entre les différents modes de contraction en terme de reproductibilité des mesures, toutefois la reproductibilité des mesures du mouvement d'extension est significativement moins bonne en excentrique (fléchisseurs) qu'en concentrique et qu'en isométrique du côté D seulement.

GC: Aucune différence de reproductibilité des mesures entre les différents modes sauf du côté D où la reproductibilité des mesures concentriques d'extension est moins bonne que celle des isométriques.

1.2.2.5 Ratio agoniste/antagoniste (RAA)

GE: RAA plus important en excentrique que dans les deux autres modes (valeurs significatives à très significatives) bilatéralement.

Le RAA isométrique est quant à lui supérieur au RAA concentrique uniquement du côté ND (significatif).

GC: RAA plus important en excentrique que dans les deux autres modes (valeurs significatives à extrêmement significatives) bilatéralement.

Le RAA isométrique est quant à lui supérieur au RAA concentrique uniquement du côté ND (très significatif).

1.3 Comparaisons entre les deux échantillons

Comparaisons réalisées grâce au « U » de Mann-Withney

1.3.1 Peak torque (PT)

Les valeurs de PT des extenseurs et des fléchisseurs en concentrique sont plus importantes chez les grimpeurs du côté ND seulement (résultats significatifs à très significatifs).

En isométrique, les valeurs de PT des fléchisseurs sont plus importantes chez les grimpeurs et ce bilatéralement (résultats très significatifs).

Enfin, il n'existe aucune différence statistiquement significative entre les valeurs de PT en excentrique des deux groupes quel que soit le groupe musculaire testé et quel que soit le côté.

1.3.2 Peak torque relatif (PT/BW)

L'analyse des résultats montre des valeurs de PT/BW plus importantes chez les grimpeurs en concentrique quel que soit le groupe musculaire testé et bilatéralement (résultats significatifs à extrêmement significatifs).

Il n'existe dans la plupart des cas pas de différences statistiquement significatives entre les deux groupes en excentrique sauf pour les fléchisseurs du côté ND plus forts chez les grimpeurs (significatifs).

Enfin les valeurs de PT/BW en isométrique des fléchisseurs sont plus grandes chez les grimpeurs bilatéralement (extrêmement significatifs), ce qu'on retrouve pour les extenseurs uniquement du côté ND (très significatifs).

1.3.3 Travail total (W)

Il n'existe aucune différence statistiquement significative entre les deux groupes en matière de W total fourni et ce quel que soit le groupe musculaire testé dans quelque mode de contraction musculaire qu'il soit.

1.3.4 Coefficient de variation (CV)

Il n'existe dans la majorité des cas aucune différence statistiquement significative entre les deux groupes en terme de reproductibilité des mesures sauf pour les sujets du GC dont les mesures de force des extenseurs en concentrique sont moins reproductibles que celles des grimpeurs du côté D (significatif).

1.3.5 Ratio agoniste/antagoniste (RAA)

Il n'existe aucune différence de RAA entre les deux groupes de sujets testés, quelque soit le côté et quelque soit le mode de contraction musculaire.

2 Recueil et analyse des données de force de préhension globale de la main (GS)

Pour l'analyse des données de GS, trois mesures ont été réalisées successivement pour chaque main (cf. protocole expérimental), ces mesures ont été retranscrites dans des tableaux et à partir de là ont été établis les calculs de moyennes, d'écart types et les différentes comparaisons.

Pour permettre une analyse plus objective, les valeurs de GS seront interprétées telles qu'elles mais aussi ramenées par unité de masse corporelle (GS/BW) (Voir tableaux 11 et 12).

GS en Kg, GS/BW sans unité (Kg/Kg)

Tableau 11 : Valeurs de GS et de GS/BW du groupe expérimental

GROUPE EXPERIMENTAL												
Q	T	D	ND	1C	Meill D	Meill ND	Moy D	Moy ND	Dom	Masse	GS/BW D	GS/BW ND
DF	1	54	49	D	56	50	54,3	49,3	D	76	0,71	0,65
	2	53	50									
	3	56	49									
TO	1	52	48	G	54	54	51,3	51,3	G	63	0,81	0,81
	2	48	54									
	3	54	52									
DQ	1	38	39	G	38	40	36	39,3	D	60	0,6	0,65
	2	36	40									
	3	34	39									
DR	1	50	45	G	55	51	52,3	47,3	D	70	0,75	0,66
	2	52	46									
	3	55	51									
DC	1	44	43	G	53	59	48,5	46,9	D	67	0,72	0,7
	2	48	39									
	3	53	59									
LN	1	43	50	D	47	50	47,9	46,5	D	65	0,74	0,71
	2	47	47									
	3	46	37									
SJ	1	48	38	D	48	49	48	43,7	G	68	0,71	0,64
	2	48	49									
	3	48	44									
GB	1	41	43	D	45	44	47,29	46,2	D	63	0,74	0,73
	2	42	40									
	3	45	44									
BG	1	55	48	G	58	48	56,3	42	D	67	0,84	0,63
	2	56	40									
	3	58	38									
Moy		48,3	45,22		49,5	49,62				0,74	0,69	
SD		6,39	5,67		6,16	5,78				0,07	0,06	

D dominant, **ND** non dominant, **1C** premier côté choisi, **Meill** meilleure valeur, **Moy** moyenne, **Dom** main dominante, **SD** standard deviation ou écart type, **Q** sujet, **T** essai

Masse (kgs), GS (Kgs), GS/BW sans unités

Tableau 12 : Valeurs de GS et de GS/BW du groupe contrôle

GROUPE CONTROLE												
Q	T	D	ND	1C	Meill D	Meill ND	Moy D	Moy ND	Dom	Masse	GS/BW D	GS/BW ND
DP	1	44	40	D	45	42	44,3	40	D	85	0,52	0,47
	2	44	38									
	3	45	42									
WM	1	46	38	D	46	38	45,3	37,7	D	70	0,65	0,54
	2	46	38									
	3	44	37									
MF	1	48	38	G	52	39	50	38,3	D	78	0,64	0,49
	2	52	39									
	3	50	39									
BB	1	40	40	D	42	43	39,7	41,7	D	83	0,48	0,5
	2	37	43									
	3	42	42									
BB	1	32	30	G	40	36	36,7	33	D	85	0,43	0,39
	2	38	33									
	3	40	36									
DE	1	35	43	D	52	44	41,6	42,3	D	80	0,52	0,53
	2	52	44									
	3	38	40									
RL	1	43	37	D	43	41	40,7	37	D	80	0,51	0,46
	2	38	33									
	3	41	41									
CM	1	38	34	G	38	38	33,3	34,6	D	85	0,39	0,41
	2	32	32									
	3	30	38									
AB	1	44	36	G	44	36	43,33	36	D	80	0,54	0,45
	2	42	36									
	3	44	36									
PR	1	32	30	G	32	36	31,3	32,7	G	76	0,41	0,43
	2	32	32									
	3	30	36									
WT	1	34	34	G	34	36	34	37,9	D	80	0,425	0,47
	2	34	34									
	3	34	36									
Moy		40,0 3	37,12		42,54 5	39				0,50	0,47	
SD		6,28	3,71		6,41	3,03				0,09	0,05	

D dominant, **ND** non dominant, **1C** premier côté choisi, **Meill** meilleure valeur, **Moy** moyenne, **Dom** main dominante, **SD** standard deviation ou écart type, **Q** sujet, **T** essai

Masse (kgs), GS (Kgs), GS/BW sans unités

3 Réponses aux questionnaires

3.1 Réponses concernant les tests isocinétiques et de GS

Les réponses aux questionnaires distribués après les tests permettent de rassembler les informations suivantes:

- 81.8 % des sujets du GC et 22.2% des sujets du GE avaient déjà eu l'occasion de monter sur une machine d'isocinétisme ; cela permet de mettre en évidence la possibilité d'un éventuel effet apprentissage et donc de valeurs peut-être plus reproductibles chez les sujets du GC. Toutefois, cela n'apparaît pas dans nos résultats.
- La plupart des sujets (90.9% des sujets du GC et 77.7% des sujets du GE) n'a pas trouvé les exercices difficiles en terme de coordination ou de compréhension du mouvement.
- Les explications ont été jugées comme suffisamment claires pour la totalité des sujets des deux groupes.
- Les tests isocinétiques ont été douloureux pour 27.3% des sujets du GC et 23.3% des sujets du GE ; les douleurs rapportées étaient en rapport avec le test excentrique dans la majorité des cas.
- 72.7% des sujets du GC et 66.6% des sujets du GE ont eu le sentiment d'avoir pu donner le maximum en terme de force musculaire ; les autres ont décrit des problèmes d'instabilité de préhension de la poignée glissant dans la main surtout lors des tests excentriques ou des mouvements d'extension.
- Seul 10% des sujets des deux populations mélangées ont décrit une sensation d'insécurité au cours des tests ; cette sensation est associée aux contractions des fléchisseurs en isométrique.
- L'échauffement a été jugé suffisant pour la quasi-totalité des sujets testés (100% des sujets du GC et 88.8% des sujets du GE).
- L'apparition de crampes musculaires au cours des tests n'a été décrite que par des sujets du GC (18.2%).
- 50% des sujets, tous groupes confondus, ont choisi la main D pour commencer le test de GS, l'autre moitié a préféré commencer par la main ND.

Il est d'ailleurs étonnant de voir que la main D n'est choisie qu'une fois sur deux pour commencer le test.

3.2 Caractéristiques physiques des deux échantillons

Tableaux 13 et 14 : Caractéristiques anthropométriques des sujets testés

Grimpeurs				
Nom	Age	Poids (Kg)	Taille (cm)	BMI (kg/m²)
FD	22	76	186	21,96
CD	30	67	175	21,89
OT	34	63	175	20,58
QD	28	60	172	20,27
NL	23	65	183	19,4
JS	25	68	170	23,52
RD	44	70	172	23,64
BG	24	63	174	20,86
GB	51	67	181	20,42
Moy	31,22	66,56	176,44	21,39
SD	10,11	4,67	5,55	1,47

Contrôle				
Nom	Age	Poids (Kg)	Taille (cm)	BMI (kg/m²)
TW	23	80	175	26,14
LR	24	80	174	26,4
MC	24	85	180	26,23
ED	17	80	187	22,86
BA	35	80	170	27,68
RP	23	76	176	24,52
BB	22	85	170	29,41
PD	45	85	183	25,37
BB	22	83	183	24,78
MW	25	70	180	21,6
FM	28	78	200	19,5
Moy	26,18	80,18	179,82	24,95
SD	7,65	4,51	8,62	2,79

Les résultats des différentes comparaisons seront décrits dans le chapitre consacré à l'analyse et à la discussion des résultats.

3.3 Calcul des niveaux moyens

Etant donnée l'échelle particulière des cotations, un intermédiaire a été nécessaire pour calculer les niveaux moyens à vue et après travail de l'ensemble de la population de grimpeurs envisagés; pour cela, une valeur a été attribuée à chaque cotation et à partir de là les moyennes ont pu être

calculées et ensuite reconverties en valeur de cotation. La même démarche a été suivie pour les valeurs d'écart types (voir tableaux 15 et 16).

Tableau 15 : Niveaux moyens à vue et après travail

	Niveaux à vue	Niveaux après travail	Equivalences numérique	
Sujets	7A+	7C+	6	10
	7B+	8A+	8	12
	7C+	8B	10	13
	7A+	7C+	6	9
	7A	7B	5	7
	7A+	7B+	6	8
	6B+	6C+	2	4
	7C	8A+	9	12
	6B+	7A	2	5
Moyennes et écarts types	7A+ ± 1 lettre et un +	7C ± 1 lettre et un +	6 ± 2,8	8,89 ± 3,2

Tableau 16 : Equivalences numériques

Niveaux	Equivalence numérique
6B	1
6B+	2
6C	3
6C+	4
7A	5
7A+	6
7B	7
7B+	8
7C	9
7C+	10
8A	11
8A+	12
8B	13

Il s'avère donc que les grimpeurs avaient un niveau moyen à **vue** de 7A+ à une lettre et un + près (de 6C à 7C) et **après travail** de 7C à une lettre et un + près (de 7A+ à 8A+). Ce niveau équivaut plus ou moins au niveau des grimpeurs étudiés dans de nombreuses études.

Enfin, les grimpeurs évalués dans notre étude avaient une expérience moyenne de $10,33 \pm 4$ ans avec une fréquence d'entraînement moyenne de $2,4 \pm 0,8$ séances par semaine au cours de la dernière année.

3.4 Epidémiologie du groupe expérimental

Malgré la taille relativement réduite de l'échantillon, les résultats seront exprimés en pourcentages par souci de clarté ; il ne s'agit, en effet, pas de déterminer des classifications épidémiologiques fiables mais de renseigner le lecteur sur les lésions rencontrées chez les sujets de ce groupe afin de pouvoir les comparer aux lésions décrites dans la littérature.

77.7% des grimpeurs interrogés répondent s'être déjà blessé au moins une fois au cours de leur pratique sportive. Parmi les 9 blessures répertoriées, 77% ont touché l'annulaire; celles-ci reprennent les lésions de poulies A2, ou A4 (57%) et des lésions tendineuses de type élongations (43%).

Les mécanismes lésionnels cités sont les positions arquées et tendues, en bi- ou en mono-doigt, les chutes et les mouvements d'épaule; parmi ceux-ci un sujet décrit une déchirure de poulie A2

suite à une glissade du pied et une décharge soudaine de poids sur les doigts en position arquée dans un dévers important, comme décrit par **Cartier et al. (1985)**, **Peters (2001)**, et **Warme et al. (2000)**. Parmi les autres blessures, on retrouve un cas de fracture de la main suite à une chute et un cas de douleurs musculaires cervico-scapulaires.

Seul 50% de ces lésions ont été diagnostiquées par un médecin, orthopédiste ou radiologue.

Enfin, parmi les plaintes les plus fréquentes, 100% des grimpeurs affirment sentir le majeur comme doigt le plus sollicité, suivi par l'annulaire (60%), l'index (40%) et l'auriculaire (20%).

IV. ANALYSE ET DISCUSSION

Pour plus de clarté nous reprendrons un par un les différents paramètres étudiés, chacun dans leur contexte de comparaisons.

1 Caractéristiques physiques des deux échantillons

La comparaison des valeurs (reprises dans le tableau 17) grâce au test non paramétrique « U » de Mann-Withney s'appliquant aux échantillons indépendants (GC et GE) montre que les grimpeurs testés ont un indice de masse corporelle (BMI) inférieur à celui des sujets testés dans le groupe contrôle (résultats très significatifs, $p=0.0057$) cette particularité semble en effet une nécessité dans un sport tel que l'escalade où tout poids supplémentaire rend l'effort plus important et où une taille relativement élevée est souvent avantageuse dans le sens où les prises de main sont plus vite à la portée du grimpeur.

Ce même test de Mann-Withney nous montre encore que les grimpeurs testés sont moins lourds que les sujets du GC (résultats extrêmement significatifs, $p= 0.0004$) ; enfin il n'existe aucune différence significative d'âge et de taille entre les deux groupes (valeurs respectives de $p=0,1957$ et $0,4243$). Cette similarité dans les tranches d'âge nous permet d'éliminer les éventuels biais et effets de celui-ci sur les mesures effectuées qu'elles soient morphologiques (BMI,...) ou dynamiques (PT, GS,...).

L'Institut Canadien de la Recherche sur la Condition Physique et le Mode de Vie (1995) montre que les valeurs de BMI les plus souvent rencontrées chez des hommes de 20 à 64 ans sont comprises entre 20 et 25 kg/m^2 (38%) ; ensuite la plupart des sujets sont au-delà de ces valeurs. **Saito et al. (2003)** parlent quant à lui de valeurs de BMI d'en moyenne 23.2 kg/m^2 chez des sujets de 69 ans en moyenne, cette valeur s'apparente plus à celles du GC.

Pour éviter toute erreur de comparaison, nous nous contenterons de comparer les résultats obtenus dans les deux groupes évalués (GC et GE) même si les valeurs de BMI du GE semblent légèrement inférieures aux normes établies par ces deux auteurs.

Tableau 17 : Caractéristiques anthropométriques des sujets testés.

	Age (années)	Masse (kg)	Taille (cm)	BMI (kg/m^2)
GC	26,18 ± 7,65	80,18 ± 4,51	179,82 ± 8,62	24,95 ± 2,79
GE	31,22 ± 10,11	66,56 ± 4,67	176,44 ± 5,55	21,39 ± 1,47

Watts et al. (1993), a observé le profil anthropométrique de grimpeurs de très haut niveau (championnats du monde). Ses résultats indiquent que ces grimpeurs sont en général de taille petite à moyenne et présentent un faible taux de graisse corporelle. **Grant et al. (1996)**, parle aussi de différences significatives de souplesse au niveau des hanches entre des grimpeurs de haut niveau et des grimpeurs de niveaux moyen et bas.

Pour des tranches d'âge tout à fait similaires, les caractéristiques anthropométriques des sujets testés dans notre étude sont tout à fait comparables avec celles de sujets d'autres études comme notamment celle de **Watts et al. (2000)** (voir tableau 18).

Tableau 18 : Caractéristiques anthropométriques de grimpeurs reprises dans la littérature

	Niveau	Age (ans)	Masse (kg)	Taille (cm)
Cartier et al., 1985	5+ - 8A	29,19	/	/
Abendroth et al., 1997	6A-7B	18 à 45	/	/
Booth et al.,1999	7B	25 ± 1	62,6 ± 3,3	175 ± 2,7
Watts et al., 2000	8A	31 ± 4,1	68,6 ± 6,9	176,8 ± 7,3
Watts et al., 2000	8A	31,1 ± 10,3	65,5 ± 5,4	173,0 ± 5,6
Quaine et al.,2003	8A	22 ± 1,4	65,6 ± 2	177,4 ± 4,5
Sheel et al., 2003	7C/7C+	18,2 ± 5,6	62,2 ± 9,2	168,5 ± 7,2

2 Comparaisons des valeurs d'un même paramètre pour les deux groupes musculaires testés

Nos résultats nous montrent de façon similaire dans les deux groupes de sujets testés que les valeurs de PT et de PT/BW des fléchisseurs sont supérieures aux valeurs des extenseurs en modes concentrique et isométrique (résultats très significatifs dans le groupe grimpeurs et extrêmement significatifs dans le groupe contrôle), et ce bilatéralement.

Aucune différence statistiquement significative n'apparaît cependant entre les valeurs de PT de ces deux groupes musculaires lors du travail excentrique; cette particularité aura, comme nous le verrons plus tard, des conséquences directes sur les valeurs de ratio agoniste/antagoniste dans ce mode de contraction.

En terme de travail, on retrouve aussi des valeurs plus importantes pour les fléchisseurs dans les deux groupes en mode concentrique (résultats extrêmement significatifs), cette constatation n'a rien d'étonnant quand on sait que ce paramètre est souvent corrélé avec le PT. Toutefois, cette relation n'apparaît pas de façon évidente en excentrique ; en explication à cela notre expérience personnelle nous fait évoquer le fait que de nombreuses contractions excentriques n'ont pas été réalisées

jusqu'au bout de la course articulaire prédéterminée pour chaque sujet, et que donc l'effort n'a pas été maintenu jusqu'à la fin du mouvement (permettant toutefois l'enregistrement des valeurs de PT) ; or le travail étant le produit de cette force et du temps, si l'effort est interrompu alors la quantité de travail fournie diminue pour une valeur de PT maximale indépendante. Ce manquement semble être dû à la difficulté des sujets à comprendre la réalisation du mouvement excentrique. Il induit donc une réalisation souvent incomplète des séries en excentrique et donc des valeurs de W plus faibles que celles attendues.

3 Asymétries bilatérales

Etant donné la similarité des résultats dans les deux groupes, nous les regrouperons donc ensemble afin de pouvoir généraliser les conclusions qui seront tirées de ce chapitre à l'ensemble des personnes testées.

Comparaisons effectuées grâce au « T » de Wilcoxon.

L'analyse de ces résultats nous montre qu'il n'apparaît aucune différence statistiquement significative entre le côté dominant et le côté non dominant non seulement dans les mesures de paramètres de reproductibilité (CV) mais aussi et surtout dans des valeurs telles que les PT, PT/BW, W et RAA. Les rares différences statistiquement significatives entre les deux côtés étant à attribuer au groupe contrôle, on peut donc dès lors émettre l'hypothèse que la notion de dominance trouve peu d'intérêt et d'application dans un sport tel que l'escalade.

En effet ceci pourrait s'expliquer par le fait que les mouvements d'escalade alternent quasiment systématiquement les mouvements de main gauche et les mouvements de main droite sans qu'il soit toujours possible de faire les mouvements plus difficiles avec la main dominante. De plus l'itinéraire de la voie et la disposition particulière des prises exigent bien souvent qu'une prise de main ne puisse être prise que par une et une seule main bien déterminée, en fonction de la position et de l'endroit dans lesquels est disposée la prise suivante. On peut donc supposer que les deux mains travaillent de façon identique, si du moins on s'en réfère aux résultats, et que donc la notion de dominance a peu d'implications dans un sport tel que celui-ci.

Les résultats ci-dessus sont en accord avec ceux de **Poullis et al. (2003)** ne montrant aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés pour des paramètres tels que PT, W, P, et RAA. **Forthomme et al. (2002)** met même en évidence une similarité entre les deux côtés en terme de reproductibilité, ce que l'on retrouve aussi dans les résultats de notre étude.

Il existe cependant à ce sujet une contradiction entre les auteurs décrivant une force supérieure du côté dominant sans différence significative (**Poulis et al. (2003)** citant **Van Swearingen (1983)** ; **Forthomme et al., 2002**) et les auteurs ne montrant aucune différence entre les deux côtés (**Poulis et al., 2003**; **Schuind et al., 2003** citant **Remy et al.**). **Forthomme et al. (2002)** décrit des asymétries D/ND variant en fonction des modes d'évaluation ; de 18% à 25% en flexion et de 13 à 14% en extension concentriques. **Forthomme et al. (2002)** citant **Sapega (1990)**, parle de normalité pour des différences inférieures à 10% et d'anormalité dans des asymétries supérieures à 20%. Cependant, cette série ne montrant aucune pathologie avec pourtant des différences supérieures à 20% dans certains cas, ces différences sont considérées comme normales. Enfin l'auteur suppose des perturbations probables de ce ratio dans des sports exploitant la latéralité, phénomène non présent dans le cas de l'escalade probablement pour les raisons évoquées plus haut.

4 Comparaisons des paramètres entre les différents modes de contraction

Nous avons choisi, ici aussi, de regrouper les résultats des deux échantillons ; le but n'étant non pas de les comparer entre eux mais d'observer les effets d'un mode de contraction (C, E, I) sur les différents paramètres envisagés (PT,...) chez tous les sujets testés.

4.1 Peak torque (PT)

Ces résultats, montrant des valeurs généralement plus importantes en excentrique qu'en isométrique ou en concentrique, sont en accord avec les conclusions de **Poulis et al.** citant **Walmsley et al. (2003)** pour qui lors de contractions isométriques et isocinétiques excentriques la tension musculaire exercée est plus importante en excentrique. Enfin **Croisier et al. (1999)** met aussi en évidence une supériorité des valeurs de PT en excentrique par rapport aux valeurs concentriques. Généralement, à une exception près, on retrouve aussi des valeurs de PT non significativement différentes en concentrique et en isométrique ; l'exception, concernant les extenseurs du côté ND plus forts en isométrique qu'en concentrique semble difficile à expliquer du fait qu'elle ne concerne en plus que le groupe contrôle.

Parmi les particularités se détachant des valeurs de notre étude la seule retenant notre attention est le fait que seule la force des fléchisseurs du poignet ne soit pas statistiquement différente en excentrique et en isométrique chez les grimpeurs ; cette particularité peut faire penser que la force isométrique est particulièrement importante

chez les grimpeurs pour équivaloir aux valeurs excentriques classiquement plus élevées, on peut en effet imaginer que ces muscles fléchisseurs sont souvent impliqués chez les grimpeurs dans un phénomène de co-contraction avec les extenseurs du poignet dans un but de stabilisation du complexe articulaire visant à offrir aux fléchisseurs des doigts (FCP et FCS) une longueur et un bras de levier optimaux pour serrer les prises de main avec un maximum de force.

Cette considération semble d'autant plus probable qu'elle apparaît bilatéralement et donc dans un contexte confirmant la faible influence de la latéralité dans ce sport.

4.2 Peak torque relatif (PT/BW)

Ces résultats nous montrent comme pour le PT que les valeurs de PT/BW sont généralement plus importantes en excentrique qu'en concentrique et qu'en isométrique (résultats significatifs à extrêmement significatifs) même si quelques exceptions existent encore ; ainsi, les valeurs de PT/BW des fléchisseurs ne sont pas statistiquement différentes dans les modes concentrique et excentrique pour le groupe grimpeurs à nouveau de façon bilatérale. La même considération que celle faite par rapport au PT peut être faite à ce sujet cette fois entre les modes excentriques et concentriques. Ici aussi on retrouve une similarité des valeurs isométriques et excentriques de PT/BW des fléchisseurs dans le groupe grimpeurs, faisant penser à nouveau à une probable plus grande spécificité isométrique de ces muscles chez les grimpeurs mais uniquement du côté D cette fois. Ceci remet partiellement en cause la question de l'influence de cette latéralité en escalade tant le PT/BW est un paramètre objectif à titre de comparaison par rapport au PT absolu.

Les valeurs concentriques et isométriques ne sont pas différentes statistiquement sauf à nouveau pour les extenseurs du côté ND plus forts en isométrique qu'en concentrique dans le groupe contrôle (résultat très significatif) et pour les fléchisseurs du côté ND plus forts en concentrique qu'en isométrique dans le groupe grimpeurs (significatif). Cette dernière particularité met partiellement en question la spécificité du travail isométrique en escalade mais elle ne concerne que le côté ND, il semble donc hasardeux d'émettre une tentative d'explication à ce sujet.

4.3 Travail total (W)

La plupart des valeurs retrouvées nous montrent qu'il n'existe quasiment pas de différences entre les deux modes concentrique et excentrique, cette observation fait appel à la remarque que nous avons déjà faite au sujet du travail excentrique et de sa difficulté de réalisation en pratique. Cependant, quelques particularités se mettent en évidence comme la plus grande quantité de travail fournie par les fléchisseurs du côté D en concentrique dans le groupe grimpeurs (significatif) et la supériorité des valeurs de W en excentrique pour les extenseurs du côté D dans le groupe contrôle (très significatif).

Toutefois, étant donnée la critique apportée ci-dessus par rapport aux valeurs de travail en excentrique, il nous semble peu fondé de tenter d'expliquer ces différences.

4.4 Coefficient de variation (CV)

Les seules et uniques différences de reproductibilité entre les différents modes de contraction concernent le mouvement d'extension excentrique (fléchisseurs) dont la reproductibilité est statistiquement moins bonne que dans les deux autres modes pour le groupe grimpeurs (significatif) (ce qui semble confirmer la difficulté de compréhension de ce mouvement même si la différence est unilatérale), et le mouvement d'extension dont la reproductibilité des mesures concentriques est moins bonne que celle des isométriques du côté dominant dans le groupe contrôle.

Nous tirerons comme conclusions de ces résultats et de nos observations pratiques lors des tests que l'analyse des résultats excentriques doit être prudente même si les différences ne sont pas importantes avec les deux autres modes.

4.5 Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)

Les résultats montrent que de façon systématique le RAA est supérieur en excentrique par rapport aux deux autres modes d'évaluation et dans les deux groupes de sujets testés de façon bilatérale (valeurs significatives à extrêmement significatives). Etant donné que cette considération touche similairement les deux groupes on peut donc en tirer des conclusions générales.

Croisier et al. (1999) cite une diminution classique du RAA en excentrique par rapport au concentrique au niveau du genou (I-J/Quadriceps) sans toutefois en donner l'explication. **Forthomme et al. (2002)** montre, lui aussi, une diminution de ce rapport en excentrique au niveau du poignet mais dans une vitesse de test excentrique (60°/s.) différente des

vitesses de tests concentriques (90°/s. et 30°/s.) ; l'auteur en tire comme conclusions que les muscles fléchisseurs du poignet sont plus forts que les extenseurs et ce dans toutes les conditions d'évaluation (concentrique, excentrique) mais sans donner d'explications complémentaires. Il s'agit là d'observations opposées à celles issues de nos résultats, peut être dues à une meilleure réalisation du mouvement de flexion que d'extension en excentrique et donc à des valeurs de PT des extenseurs relativement meilleures par rapport à celles des fléchisseurs.

Le RAA isométrique est quant à lui supérieur au RAA concentrique uniquement du côté ND chez les sujets du groupe contrôle (très significatif) et du groupe grimpeurs (significatif) ; cette augmentation du RAA isométrique du côté ND est corrélée dans les deux groupes à une supériorité des valeurs de PT isométrique par rapport au concentrique (significatives dans le GC, non significatives dans le GE). Toutefois, il paraît difficile de donner une explication rationnelle au fait que cette caractéristique apparaisse dans les deux groupes du côté ND seulement, et seulement pour les fléchisseurs d'autant plus qu'étant donné la position de tests invariable en isométrique (45° d'extension du poignet quelque soit le groupe musculaire testé), on aurait pu s'attendre à des valeurs de PT relativement moins importantes en isométrique qu'en concentrique pour les extenseurs (étant donné la course déjà réduite de ces muscles en position d'extension), et donc à des valeurs de RAA plus faibles en isométrique qu'en concentrique (où le muscle à l'occasion de développer son coupe de force maximal lorsqu'il passe par sa longueur optimale).

Peut être peut on avancer l'hypothèse que ce test a été mieux compris et mieux réalisé par l'ensemble des sujets. Enfin, on ne peut pas non plus parler de supériorité générale isométrique car cette particularité ne se retrouve que pour le côté ND.

5 Comparaisons entre les deux groupes

5.1 Peak torque (PT)

Le principal résultat retenant notre attention est la supériorité des valeurs isométriques des fléchisseurs chez les grimpeurs de façon bilatérale par rapport aux autres sujets (très significatif), en effet ceci va dans le sens des hypothèses déjà émises précédemment (faible influence de la latéralité en escalade, phénomène de co-contraction avec les extenseurs) même si on retrouve aussi des valeurs supérieures chez les grimpeurs pour les deux groupes musculaires en concentrique uniquement du côté ND. Cette importance de valeur des extenseurs explique peut-être leur contribution (évoquée plus haut) dans le rôle

de stabilisation du poignet, visant à contrecarrer la composante de mouvement de flexion sur le poignet des muscles fléchisseurs des doigts serrant une prise de main (même si il n'est question dans les résultats que du côté ND), on observe en effet que le poignet occupe dans la majorité des cas une position statique en escalade.

Toutefois, il ne s'agit là que d'une hypothèse et de tels résultats auraient eu plus de poids en mode isométrique qu'en concentrique pour expliquer un rôle de stabilisation.

Cependant une autre situation peut être évoquée car la littérature (52) nous montre que les fléchisseurs propres des doigts interviennent dans la flexion de poignet si leur course est interrompue et bloquée en cours (comme par exemple si les doigts maintiennent une poignée et que le poignet réalise une flexion à ce moment là) ; on peut donc imaginer que ces augmentations de PT isométriques en flexion de poignet sont le reflet d'une plus grande implication absolue de ces muscles fléchisseurs des doigts dans la flexion de poignet chez les grimpeurs dont il sera montré plus loin (voir 6.1) que la force de préhension est statistiquement supérieure à celles des sujets du groupe contrôle.

L'étude de **Poulis et al. (2003)** appuie cette hypothèse en montrant que les valeurs de PT et de W des fléchisseurs et des extenseurs du poignet sont plus importantes avec une poignée de test de diamètre plus petit. Ce résultat nous prouve que la contribution des muscles fléchisseurs des doigts est réelle dans les mouvements de FEM du poignet ; en effet, le diamètre de la poignée n'influe a priori en aucun cas sur la course tendineuse (bras de levier) des muscles moteurs du poignet contrairement à celle des fléchisseurs digitaux. Ceci nous laisse donc imaginer que l'augmentation des valeurs de PT chez les grimpeurs est due à l'augmentation des valeurs de force des fléchisseurs des doigts (GS).

Enfin, nous n'avons relevé aucune différences en mode excentrique entre ces deux groupes ; cette différence peut éventuellement être due à des propriétés biomécaniques (non spécificité du travail excentrique des muscles du poignet en escalade) ou encore aux particularités quelque peu hasardeuses de cette modalité d'évaluation.

A titre de comparaison, quelques résultats issus d'autres études isocinétiques ont été repris dans le tableau 19, parallèlement à ça seront repris nos résultats sous forme de moyennes à titre comparatif (tableaux 20 et 21).

Tableau 19 : Valeurs de PT dans la littérature

Auteurs	Muscles	Test	n	PT-D (Nm)	PT-ND (Nm)	Avant bras	Machine
Poulis et al., 2003	Fléchisseurs	C90	40	9.9 ± 3.4		SUP	Cybex II
		C45		13.5 ± 3.9			
	Extenseurs	C90		5.4 ± 2.08			
		C45		7.5 ± 2.66			
Schuind et al., 2003 citant Remy et al.	Fléchisseurs	/	42	11.9		/	Cybex Norm
	Extenseurs	/		8.0			
Schweizer et al., 2003	Fléchisseurs	C	26	19.1 ± 3.6		SUP	Machine expérimentale
		E		22.6 ± 4.5			
Forthomme et al., 2002	Fléchisseurs	C90	20	26.7 ± 4.5	20.7 ± 4.3	PRO	Cybex Norm
		C30		26.1 ± 2.8	21.5 ± 3.8		
		E60		33.4 ± 4.9	26.1 ± 4.2		
	Extenseurs	C90		10.6 ± 2	10.5 ± 1.8		
		C30		11.3 ± 2.3	12.5 ± 2.22		
		E60		17 ± 4.6	17.1 ± 4.2		

C, concentrique; **E**, excentrique; **30,60,90**, vitesses; **PT**, peak torque; **D**, dominant; **ND**, non dominant; **PRO**, pronation; **SUP**, supination

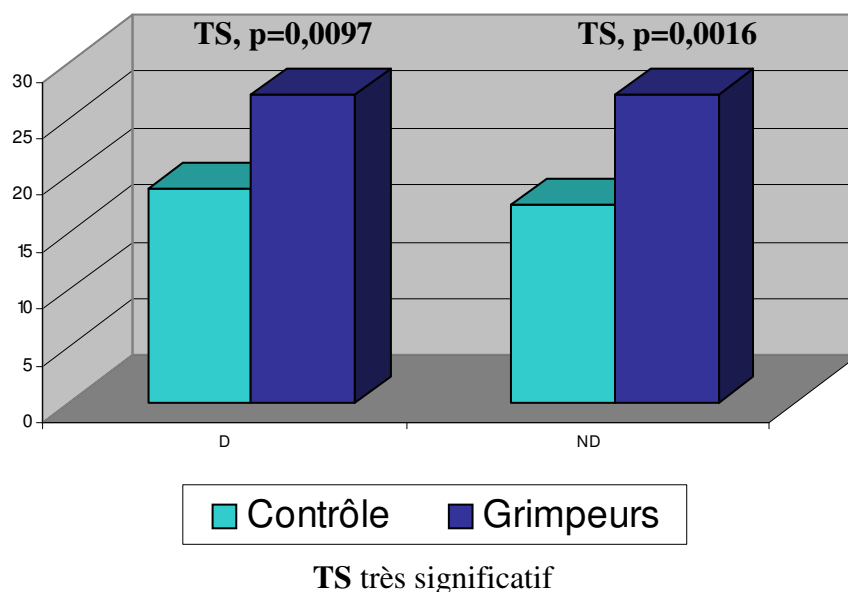
Tableau 20 : Valeurs de PT du groupe contrôle

GROUPE CONTROLE	PT CONCENTRIQUE				
	EXTENSEURS		FLECHISSEURS		
	D	ND	D	ND	
	Moy (Nm)	9,78	7,3	22,44	19,48
	SD (Nm)	1,63	1,47	5,66	4,76
	EXCENTRIQUE				
	EXTENSEURS		FLECHISSEURS		
	D	ND	D	ND	
	Moy (Nm)	26,83	24,04	27,58	27,41
	SD (Nm)	8,25	9,28	7,03	6,23
ISOMETRIQUE					
EXTENSEURS		FLECHISSEURS			
D	ND	D	ND		
Moy (Nm)	10,1	10,18	18,8	17,33	
SD (Nm)	2,81	2,37	4,73	3,37	

Tableau 21 : Valeurs de PT du groupe grimpeurs

GROUPE GRIMPEURS	PT CONCENTRIQUE				
	EXTENSEURS		FLECHISSEURS		
	D	ND	D	ND	
	Moy (Nm)	11,97	11,24	28,11	27,79
	SD (Nm)	3,07	4,19	4,34	2,63
	EXCENTRIQUE				
	EXTENSEURS		FLECHISSEURS		
	D	ND	D	ND	
	Moy (Nm)	34,43	28,88	34,02	32,02
	SD (Nm)	14,87	10,44	13,44	6,17
ISOMETRIQUE					
EXTENSEURS		FLECHISSEURS			
D	ND	D	ND		
Moy (Nm)	13	15,21	27,06	27,01	
SD (Nm)	3,14	5,72	3,76	6,91	

Graphique 2: Comparaison des valeurs de PT en isométrie des fléchisseurs (Nm)



Il est délicat de comparer des valeurs issues d'autres études ne s'étant pas déroulées de la même manière (différences de protocoles, d'échauffements, d'échantillons, de vitesses d'évaluation, de machines utilisées,...) et c'est donc avec prudence que les comparaisons que nous en ferons devront être interprétées. Tout d'abord la première chose à constater est l'importante différence de valeurs absolues d'une étude à l'autre; on voit par exemple des valeurs de 9,9 à 26,7 Nm pour une même valeur de PT en concentrique à 90°/seconde entre les deux études de **Poullis et al. (2003)** et **Forthomme et al. (2002)** dont la seule grosse différence semble être la position de test de l'avant bras en supination et en pronation respectivement. Uniquement pour cette raison nous nous contenterons de cette seule étude à titre comparatif (**Forthomme et al., 2002**) ; celle-ci montre en effet des résultats semblables à ceux de notre étude pour deux vitesses toutefois différentes de 30°/s et 90°/s mais avec une position d'avant bras semblable.

Nous en concluons donc que les valeurs de notre étude semblent être en accord avec les valeurs de **Forthomme et al. (2002)**, les grimpeurs se situant un peu au dessus et les sujets du groupe contrôle un peu en deçà. Enfin, on peut encore noter que les résultats de **Schweizer et al. (2003)** sont du même ordre de grandeur même si la machine utilisée et la position de test étaient différentes.

Rq: aucune influence de l'âge n'a jamais pu être mise en évidence sur les valeurs absolues de PT (86).

5.2 Peak torque relatif (PT/BW)

On remarque que les valeurs de PT et de PT/BW se suivent souvent mais montrent toutefois quelques différences mettant en évidence les différences anthropométriques des deux échantillons étudiés. A ce titre, on voit que les grimpeurs présentent des valeurs concentriques de PT/BW supérieures à celles des sujets du groupe contrôle pour les deux groupes musculaires bilatéralement cette fois alors que seul le côté ND avait enregistré des valeurs de PT supérieures. En isométrique, on observe le même phénomène que pour les valeurs de PT à savoir une supériorité des valeurs de PT/BW des fléchisseurs bilatéralement mais en plus des valeurs de PT/BW des extenseurs statistiquement supérieures côté ND seulement.

Plutôt que de chercher à expliquer les différences de supériorité de valeurs d'un côté à l'autre suivant tel ou tel paramètre, nous constaterons simplement la constante supériorité des grimpeurs pour les valeurs de PT et de PT/BW des fléchisseurs en isométrique et de façon bilatérale. Ensuite, de façon évidente ressort la supériorité des valeurs concentriques de PT et de PT/BW aux deux groupes musculaires testés (bilatéralement pour le PT/BW et uniquement du côté ND pour le PT) pour les grimpeurs.

A titre comparatif seront reprises les valeurs de PT/BW de l'étude de **Forthomme et al. (2002)**, ces valeurs sont à nouveau très proches de celles de notre étude ce qui nous laisse croire en la cohérence de nos résultats. On observe en effet des valeurs légèrement inférieures aux normes de **Forthomme et al.** pour les sujets du groupe contrôle et des valeurs au contraire légèrement supérieures pour les grimpeurs avec des valeurs d'écart types tout à fait comparables.

Tableau 22 : Valeurs de PT/BW

Muscles	Test	NPT-D	NPT-ND
Fléchisseurs	C90	35 ± 4	28 ± 5
	C30	35 ± 5	29 ± 5
	E60	44 ± 6	34 ± 6
Extenseurs	C90	14 ± 2	14 ± 2
	C30	15 ± 3	17 ± 4
	E60	23 ± 8	24 ± 6

C, concentrique; **E**, excentrique; **30,60,90**, vitesses; **NPT**, peak torque normalisé

D'après **Forthomme et al. (2002)**

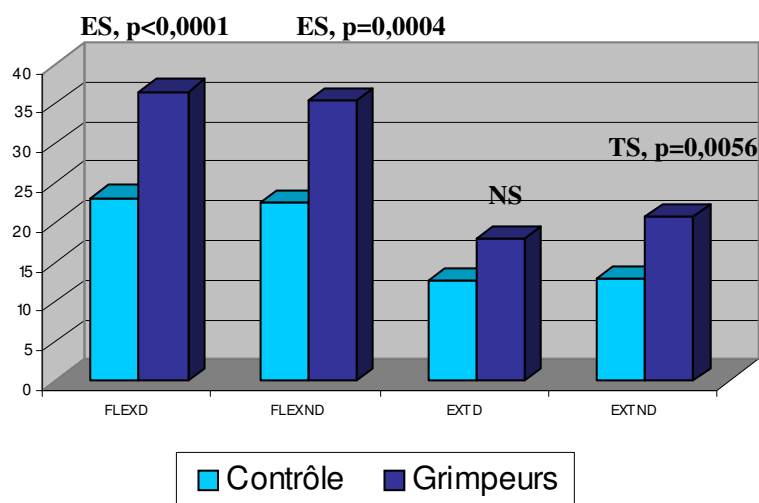
Tableau 23 : Valeurs de PT/BW du groupe contrôle

		PT/BW			
		CONCENTRIQUE		EXCENTRIQUE	
Moy	SD	EXTENSEURS	FLECHISSEURS	EXTENSEURS	FLECHISSEURS
		D	ND	D	ND
		12,55	8,96	27,94	24,13
		2,83	1,91	8,88	6,58
		34,05	30,73	35,21	34,87
		10,95	12,01	9,79	8,07

Tableau 24 : Valeurs de PT/BW du groupe grimpeurs

		PT/BW			
		CONCENTRIQUE		EXCENTRIQUE	
Moy	SD	EXTENSEURS	FLECHISSEURS	EXTENSEURS	FLECHISSEURS
		D	ND	D	ND
		18,26	17,08	42,42	40,51
		5,43	6,77	6,88	5,45
		50,21	42,11	49,1	46,59
		23,49	17,19	21,36	12,39

Graphique 3: Comparaison des valeurs de PT en isométrique



FLEX fléchisseurs **EXT** extenseurs **D** dominant **ND** non dominant
ES extrêmement significatif **TS** très significatif **NS** non significatif

5.3 Travail (W)

L'observation des résultats ne montre aucune différences statistiquement significatives entre les deux groupes en matière de travail fourni paradoxalement aux valeurs différentes de PT entre ces deux groupes. En observant les valeurs, la quantité de travail fournie est similaire, et peut être peut-on attribuer ces résultats étonnants aux difficultés déjà

évoquées pour le travail excentrique. Toutefois en concentrique, il est étonnant de ne voir aucune différence, peut être doit on attribuer cela à une meilleure régularité des sujets du groupe contrôle; en effet les valeurs de PT correspondantes étant statistiquement plus faibles, les valeurs de travail n'ont pu être semblables à celles du groupe grimpeurs que par une meilleure régularité et une meilleure performance sur le long terme. Etant donné la grande variation des protocoles expérimentaux retrouvés dans la littérature, nous ne comparerons pas les valeurs obtenues à celles d'autres études pour la seule raison qu'aucun protocole n'a réalisé le même nombre de répétitions, à la même vitesse, en même mode.

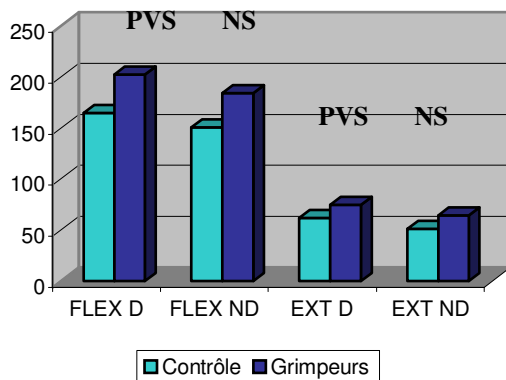
Tableau 25 : Valeurs de W du groupe contrôle

		W			
		CONCENTRIQUE			
CONTRÔLE		EXTENSEURS	FLECHISSEURS		
	Moy (Nm)		61,93	51,25	164,88
SD		13,3	16,44	37,16	43,53
		EXCENTRIQUE			
		EXTENSEURS	FLECHISSEURS		
Moy (Nm)		105,8	93,34	146,5	126,13
SD		28,96	69,44	43,7	61,18

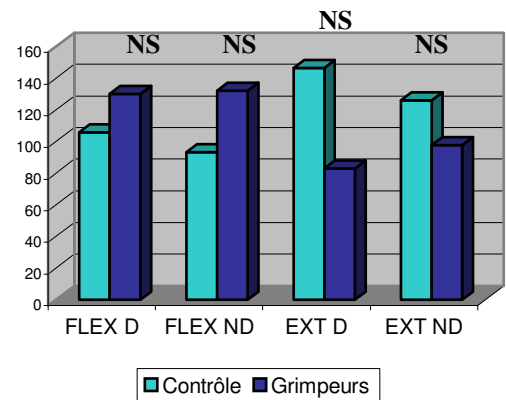
Tableau 26 : Valeurs de W du groupe grimpeurs

		W			
		CONCENTRIQUE			
GRIMPEURS		EXTENSEURS	FLECHISSEURS		
	Moy (Nm)		74,8	64,53	202,7
SD		12	29,87	41,82	50,16
		EXCENTRIQUE			
		EXTENSEURS	FLECHISSEURS		
Moy (Nm)		83	97,66	130	132,18
SD		95,7	129,4	62,7	64,46

Graphique4: Comparaison des valeurs de W en concentrique (J)



Graphique5: Comparaison des valeurs de W en excentrique (J)



FLEX fléchisseurs **EXT** extenseurs **D** dominant **ND** non dominant **ES** extrêmement significatif
TS très significatif **PVS** pas vraiment significatif **NS** non significatif

5.4 Coefficients de variation (CV)

Aucune différence statistiquement significative n'apparaît entre les deux groupes sauf en concentrique où les valeurs des sujets du groupe contrôle sont moins reproductibles que celles des grimpeurs pour les extenseurs du côté D. Ceci peut être considéré comme un détail, toutefois les valeurs présentes dans notre étude (tableaux 28 et 29) sont supérieures à celles de l'étude de **Forthomme et al. (2002)** annonçant des coefficients de variation (CV) bas signant une bonne fiabilité absolue des mesures sur **Cybex™ Norm** (voir tableau 27).

Tableau 27 : CV(%) pour les muscles fléchisseurs et extenseurs du poignet.

Test	Groupe musculaire	
	Flexion	Extension
C 90	6.6	6.2
C 30	4.9	9.4
E 60	5.6	6.9

C, concentrique ; E, excentrique; 30, 60, 90, vitesses

D'après **Forthomme et al. (2002)**

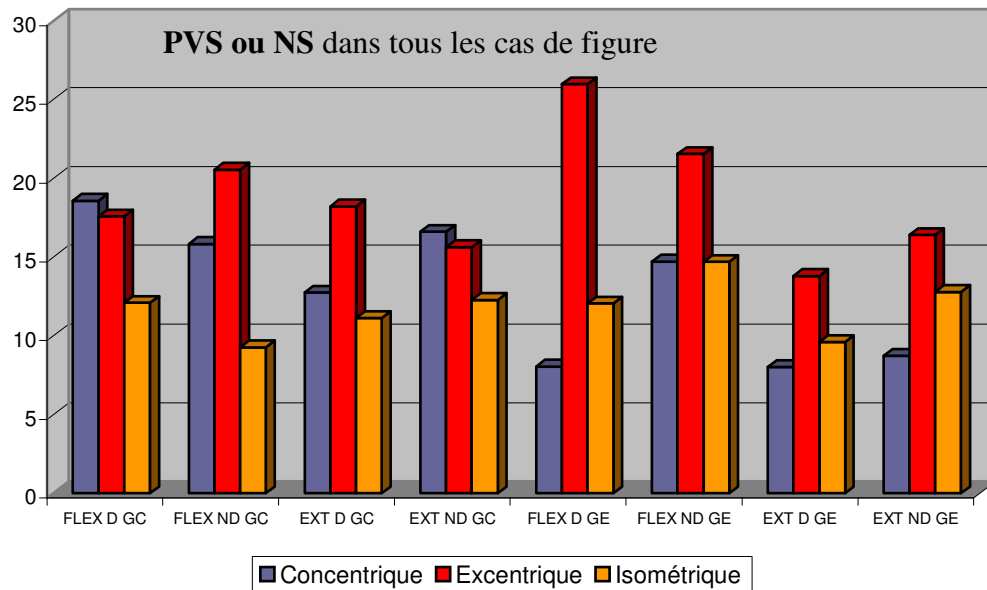
Tableau 28 : Valeurs de CV du groupe contrôle

CONTROLE	CV				
	CONCENTRIQUE				
	EXTENSEURS FLECHISSEURS				
		D	ND	D	ND
	Moy (Nm)	18,57	15,83	12,74	16,6
	SD	14,72	11,59	6,23	14,91
	EXCENTRIQUE				
	EXTENSEURS FLECHISSEURS				
		D	ND	D	ND
	Moy (Nm)	18,2	15,63	17,57	20,54
SD	11,45	14,15	9,85	13,64	
ISOMETRIQUE					
EXTENSEURS FLECHISSEURS					
	D	ND	D	ND	
Moy (Nm)	11,13	12,28	12,09	9,26	
SD	7,74	9,03	6,1	5,87	

Tableau 29 : Valeurs de CV du groupe grimpeurs

GRIMPEURS	CV				
	CONCENTRIQUE				
	EXTENSEURS FLECHISSEURS				
		D	ND	D	ND
	Moy (Nm)	8,04	14,71	8	8,72
	SD	5	9,14	4,57	4,86
	EXCENTRIQUE				
	EXTENSEURS FLECHISSEURS				
		D	ND	D	ND
	Moy (Nm)	13,8	16,39	25,97	21,53
SD	14,36	8,59	21,28	15,11	
ISOMETRIQUE					
EXTENSEURS FLECHISSEURS					
	D	ND	D	ND	
Moy (Nm)	9,6	12,79	12,06	14,7	
SD	4,15	10,75	6,39	9,9	

Graphique.6: Comparaison des CV selon le groupe (GC/GE) et le mode de contraction



PVS pas vraiment significatif NS non significatif
 GC groupe contrôle GE groupe expérimental

Enfin, même si d'après **Bouilland et al., (2001)** aucune étude connue n'a jamais évalué la reproductibilité des mesures obtenues par des tests de poignet, **Chan et Maffulli (1996)** parlent d'une reproductibilité plus faible pour le poignet due au fait que les PT et les amplitudes de mouvements parcourues sont plus faibles (et donc les variations dans des valeurs de couple aussi faibles sont évidemment accrues si le dynamomètre n'enregistre pas les décimales). Enfin **Schuind et al., (2003)** citant **Remy et al.** souligne de bons coefficients de corrélation (0.88 et 0.96) à des vitesses de 0°/s, 60°/s et 120°/s.

D'après **Forthomme et al. (2002)**, ces CV tendent à diminuer en concentrique à vitesse basse et à augmenter en excentrique et à vitesses élevées. Il parle aussi d'un cas particulier de CV élevés, à savoir les vitesses basses en concentrique sur les extenseurs, ce qui ne semble pas se passer dans notre cas. Enfin, nous terminerons en signalant que les conditions expérimentales des tests isocinétiques auraient pu être meilleures avec un matériel permettant un appui antébrachial plus important et une meilleure préhension de la poignée que celui mis à disposition par **Biodex™**, de plus un système efficace de fixation du coude permettrait probablement d'éviter les compensations apparaissant inévitablement lors de l'effort maximal.

5.5 Ratio agoniste/antagoniste (RAA) ou (R)

Il n'existe aucune différence significative entre les deux groupes à ce sujet quelque soit le mode d'évaluation et quel que soit le côté évalué. En effet la supériorité des valeurs isométriques de PT des fléchisseurs chez les grimpeurs des deux côtés, et l'absence de différences significatives de ces mêmes valeurs pour les extenseurs ne se traduit pas par une différence de RAA entre ces deux groupes. On voit cependant une différence entre les valeurs moyennes de ces deux groupes avec des valeurs abaissées chez les grimpeurs mais ces résultats ne sont pas significatifs; un effectif plus important aurait peut être changé ces résultats. Pour l'instant nous ne pouvons conclure ce sujet autrement qu'en disant qu'il n'existe pas de perturbations du ratio extenseurs/fléchisseurs chez des grimpeurs de haut niveau si toutefois nous considérons la population contrôle comme saine.

En réponse à la question posée dans l'étude de **Forthomme et al. (2002)** au sujet des éventuels effets d'une pratique sportive à haut niveau sur ce ratio, nous répondons qu'il n'existe, d'après nos résultats, pas d'effet direct de la pratique d'escalade à haut niveau sur la balance agoniste/antagoniste au niveau du poignet en flexion-extension.

D'après **Croisier et al. (1999)** un tel déséquilibre favorise, au niveau du genou, la survenue de blessures ligamentaires et musculaires ; nous voyons que cette considération ne trouve pas sa place au niveau du poignet dans notre étude.

Ce rapport est chiffré pour **Poullis et al. (2003)** aux alentours de 0.57 ; cette valeur équivaut à celle que l'on retrouve comme référence dans les protocoles d'évaluation de l'appareil **Biodex™ system 3 pro**. **Forthomme et al. (2002)** montre par contre des valeurs différentes de ce ratio comprises entre 0.39 et 0.55 en concentrique et entre 0.49 et 0.81 en excentrique ; le fait que ces valeurs soient inférieures à celles de l'étude de **Poullis et al. (2003)** s'explique probablement par le fait que la correction de la pesanteur n'a pas été apportée dans l'étude de **Forthomme et al. (2002)** et que donc cela profite aux fléchisseurs de par la position de test en pronation, induisant donc une diminution de ce rapport. Enfin **Schuind et al. (2003)** citant **Remy et al.** montre un rapport équivalent à 0.67 chez les hommes et 0.66 chez les femmes. Ces résultats toutefois différents montrent malgré tout une supériorité des fléchisseurs dans tous les modes d'évaluation ; celle-ci se chiffre à la fois dans les valeurs de PT moyens, mais aussi dans les valeurs de puissance et de travail musculaires et ce dans les modes concentrique et isométrique d'après **Poullis et al. (2003)**. Ce même auteur montre cependant que ce ratio reste inchangé avec l'augmentation de vitesse et avec le changement de la taille de poignée.

Rq: cette correction de la pesanteur a été apportée dans le cas de notre étude.

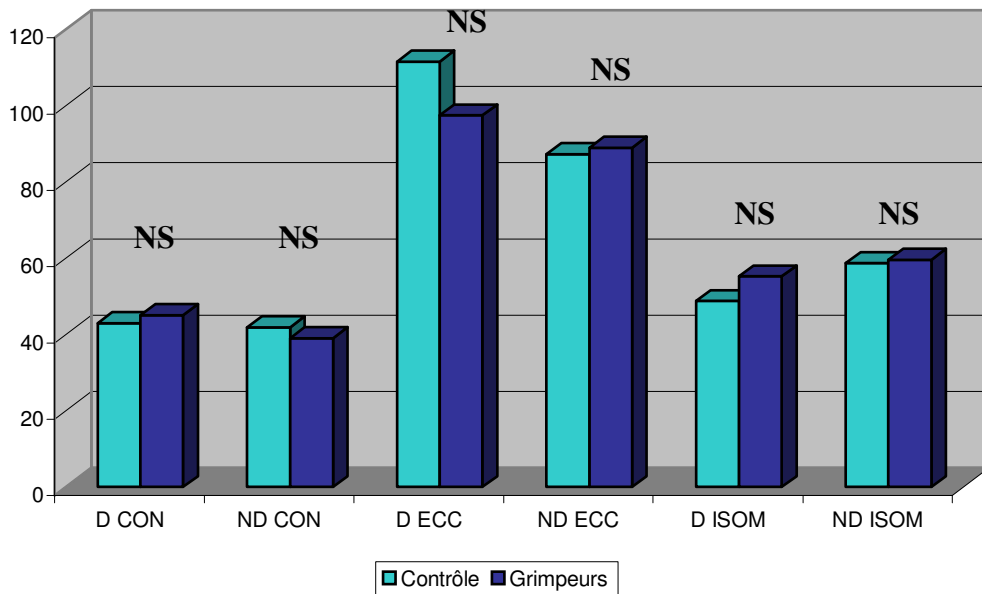
Tableau 30 : Valeurs de RAA du groupe contrôle

CONTRÔLE	RATIO AGO/ANTAGO		
		CONCENTRIQUE	
		D	ND
Moy(Nm)	45,06	39,06	
SD	9,33	10,42	
	EXCENTRIQUE		
	D	ND	
Moy(Nm)	97,47	89,02	
SD	20,69	34,97	
	ISOMETRIQUE		
	D	ND	
Moy(Nm)	55,24	59,61	
SD	16,99	11,84	

Tableau 31 : Valeurs de RAA du groupe grimpeurs

GRIMPEURS	RATIO AGO/ANTAGO		
		CONCENTRIQUE	
		D	ND
Moy(Nm)	42,98	41,87	
SD	10,41	14,63	
	EXCENTRIQUE		
	D	ND	
Moy(Nm)	111,58	87,29	
SD	68,75	21,41	
	ISOMETRIQUE		
	D	ND	
Moy(Nm)	48,82	58,76	
SD	12,98	26,55	

Graphique7: Comparaisons des ratio agoniste/antagoniste



D dominant **ND** non dominant **CON** concentrique **ECC** excentrique
NS non significatif

6 Comparaisons des valeurs de force de préhension globale (GS et GS/BW)

GS en Kg, GS/BW sans unité (Kg/Kg)

6.1 Force de préhension globale de la main (GS)

L'analyse des résultats nous montre qu'il n'existe aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés D et ND, qu'il s'agisse de comparaisons des valeurs moyennes de GS dans GC ou GE, ou de comparaisons des valeurs maximales de GS dans GC ou GE.

Résultats obtenus grâce au « T » de Wilcoxon.

Pour tenter de systématiser les asymétries bilatérales en terme de GS, plusieurs études parlent de *loi des 10%*, cette loi veut que la main dominante soit de 10% plus forte que la non dominante; **Petersen et al. (1989)** confirme partiellement cette loi en la validant uniquement chez les droitiers, on peut donc globalement la considérer comme utile et relativement fiable.

Nos résultats sont relativement en accord avec cette loi. **Incel et al. (2002)** parle lui aussi de différences (significatives) entre D et ND mais lui aussi uniquement chez les droitiers. Alors que les résultats de **Mathiowetz et al. (1985)** nuancent légèrement le sens de cette loi en fonction de l'âge avec des différences beaucoup plus importantes au-delà de 55 ans (15-20%) et des différences minimales entre 40 et 45 ans (3%).

La comparaison entre les deux groupes des valeurs moyennes de GS nous montre que les sujets du groupe grimpeurs ont développé une force de préhension globale de la main sur le dynamomètre statistiquement supérieure à celle développée par les sujets du groupe contrôle à la fois du côté D (résultats très significatifs, $p=0,0031$) et du côté ND (résultats extrêmement significatifs, $p=0,0001$) (voir tableau 32).

Résultats obtenus grâce au « U » de Mann-Withney.

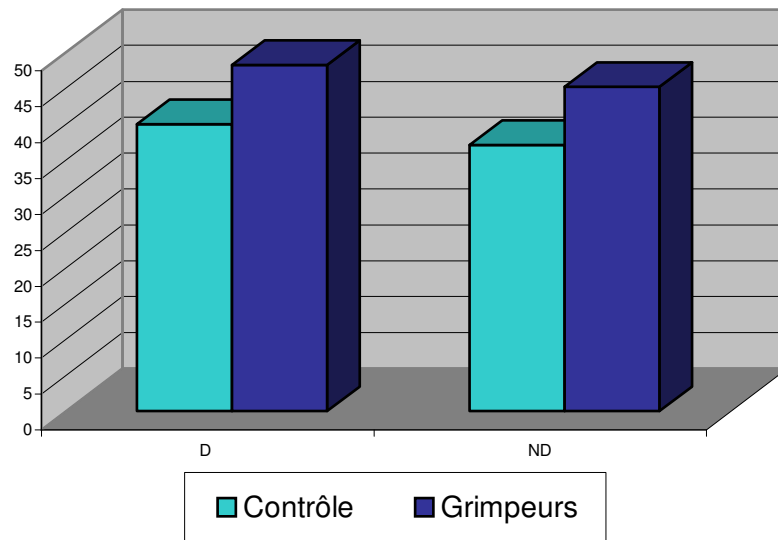
Tableau 32 : Valeurs de GS et de GS/BW des deux groupes de sujets testés

GROUPE CONTROLE									
	D	ND	Meill D	Meill ND	Moy D	Moy ND	GS/BW D	GS/BW ND	
Moy	40,03	37,12	42,54	39	40,02	37,38	0,5	0,47	
SD	6,28	3,71	6,41	3,03	5,73	3,19	0,09	0,05	

GROUPE EXPERIMENTAL									
	D	ND	Meill D	Meill ND	Moy D	Moy ND	GS/BW D	GS/BW ND	
Moy	48,29	45,22	49,5	49,625	49,1	45,83	0,735	0,69	
SD	6,39	5,67	6,16	5,78	5,83	3,67	0,07	0,06	

D dominant, ND non dominant, 1C premier côté choisi, Meill meilleure valeur, Moy moyenne, Dom main dominante, SD standard deviation ou écart type

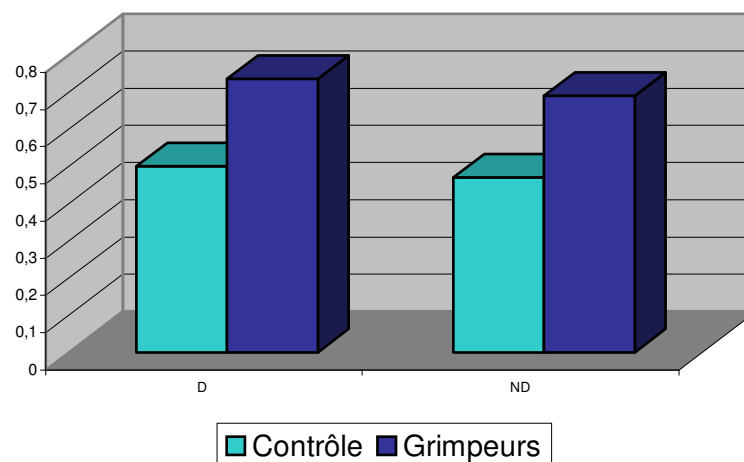
Graphique8.: Comparaison des valeurs de GS (Kgs)



6.2 Force de préhension globale ramenée par unité de masse corporelle (GS/BW)

Parallèlement aux valeurs retrouvées pour la GS, on s'aperçoit que les valeurs de GS/BW sont supérieures chez les grimpeurs des deux côtés (résultats extrêmement significatifs, $p < 0,0001$). Il n'existe pas non plus de différences statistiquement significatives entre les deux côtés D et ND pour le groupe contrôle ($p = 0,1475$), et pas de différences vraiment significatives entre les deux côtés D et ND pour le groupe grimpeurs ($p = 0,0547$).

Graphique 9: Comparaison des valeurs de GS/BW



Le fait que les différences de GS/BW soient plus importantes entre les deux groupes que les différences de GS met en avant les différences de morphologies entre ces deux groupes.

Ces résultats reflètent l'évidente contribution des muscles fléchisseurs des doigts en escalade, de plus les résultats obtenus sont en accord avec les autres résultats de GS et de GS/BW trouvés dans la littérature à ce sujet (Voir tableau 33).

Là encore, il n'apparaît aucune différence statistiquement significative entre les deux côtés chez les grimpeurs; ceci nous conforte dans l'idée que l'escalade n'exploite pas réellement la latéralité.

Tableau 33 : Valeurs de GS retrouvées dans la littérature

	Niveau	GS-D (kg)	GS-ND (kg)	GS/BW
Cartier et al., 1985	5+ - 8A		47	/
Abendroth et al., 1997	6A-7B	/	/	0,76 ± 0,04
Booth et al.,1999	7B	/	/	/
Watts et al., 2000	8A	51,6 ± 7,9		0,75 ± 0,06
Watts et al., 2000	8A	51,7 ± 7,5		0,79 ± 0,08
Quaine et al.,2003	8A	/	/	/
Sheel et al., 2003	7C/7C+	48,1 ± 11,9	/	/

Etant donné la population étudiée dans ce travail, nous nous contenterons de reprendre les valeurs normatives de populations masculines et nous ne comparerons les valeurs obtenues que par rapport à celles issues de tests effectués dans la même position, à savoir celle adoptée par la ASHT. En effet d'autres valeurs, issues de tests réalisés en position debout et coude tendu révèlent des valeurs de GS démesurées (**Incel et al., 2002**).

Afin d'avoir une vue d'ensemble des données que regroupe la littérature, le tableau 34 reprend ces valeurs en fonction de l'âge, du sexe et de la position de test.

Tableau 34 : Valeurs de GS en fonction du sexe, de l'âge et de la position de test

Auteurs	Age	Sexe	n	GS D (Kgs)	GS ND (Kgs)	Position de test
Haidar et al., 2004						ASHT
Incel et al.,2002	30.21 ± 5.91	M/F	149	86.6 ± 24.7	79.13 ± 23.68	Debout, coude tendu
Peolsson et al., 2001	25-34	M	13	54	54	ASHT
	35-44	M	15	50	49	ASHT
Kamimura et al., 2001	23 ± 4.5	M	25	50 ± 10.1	46 ± 9.8	ASHT
Astin et al., 1999	18-29	M/F	61	35.9 ± 11.4		Assis, coude tendu
	30-39	M/F	19	44.9 ± 10.4		Assis, coude tendu
	40+	M/F	20	32.8 ± 10.9		Assis, coude tendu
Fraser et al., 1999	59.9 ± 12	M	14	32.2 ± 7.7	30.2 ± 7.2	ASHT
Imrhan, 1989	/	M	40	48.7 ± 1.9		/
Mathiowetz et al., 1985	20-24	M		54.88 ± 9.34	47.4 ± 9.88	ASHT
	25-29	M	288	54.79 ± 10.43	50.12 ± 7.34	ASHT
	30-34	M		55.24 ± 10.16	50.07 ± 9.84	ASHT
	35-39	M		54.29 ± 10.88	51.21 ± 9.84	ASHT

Les valeurs obtenues dans notre étude semblent inférieures à celles retrouvées dans la littérature; cette distinction est probablement due à une différence de méthodologie expérimentale (dynamomètre légèrement différent, calculs de moyenne réalisés à partir des valeurs maximales...). L'important dans le cas de notre étude est de garder la même méthodologie entre les deux groupes testés pour s'assurer qu'aucun biais ne trompe l'interprétation des résultats.

En relation directe avec la problématique biomécanique et physiopathologique de l'annulaire et du majeur en escalade, et avec les tests de GS on sait que le majeur et l'index tendent à être les doigts les plus forts en mesurant la GS. En déterminant le pourcentage de contribution de chaque doigt, on a montré que le majeur supporte beaucoup de force dans les forces de préhension, suivi de près par l'index (49). Il a aussi été montré que l'annulaire et le petit doigt combinés étaient responsables de la prise en charge d'un tiers de la force totale de GS, ce qui confirme que la majorité de la force générée dans un test de GS l'est par l'annulaire et le majeur (49).

Ceci explique probablement en partie la fréquence importante de lésions de ces doigts plus particulièrement en escalade.

V. CONCLUSIONS

La multitude de lésions spécifiques apparaissant dans la pratique courante de ce sport et l'augmentation de leur fréquence d'apparition ont donné naissance à de multiples études biomécaniques et physiopathologiques essentiellement centrées sur les problèmes de la main. L'absence quasi-totale de littérature à ce sujet nous a donc mené au problème plus particulier de la biomécanique du poignet et de l'éventuelle influence de l'escalade à son niveau. En parallèle, les différentes particularités spécifiques de ce sport et des grimpeurs en général ont été abordées, qu'elles soient techniques, biomécaniques, métaboliques ou physiopathologiques. Toutes ces caractéristiques permettent à présent au lecteur, qu'il soit thérapeute ou non, de mieux comprendre à la fois le sport en lui-même avec les spécificités biomécaniques qu'il induit (sollicitations articulaires, tendineuses, musculaires ou encore nerveuses) mais aussi la nature des lésions touchant cette population de sportifs, leur(s) origine(s), et leur localisations préférentielles (annulaire, majeur,...).

Les réponses aux questionnaires distribués nous ont permis de voir que les lésions décrites par les grimpeurs évalués appartiennent bien à l'ensemble que l'on pourrait appeler "*lésions spécifiques du grimpeur*" ; ces lésions, davantage ostéo-articulaires et musculo-tendineuses, intéressent comme nous avons pu le décrire, essentiellement le membre supérieur et plus fréquemment la main et le poignet.

Nos résultats montrent que les sujets testés dans notre étude présentent des caractéristiques similaires à celles des sujets testés dans la littérature à la fois en matière d'anthropométrie mais aussi de force de préhension de la main, de niveau de pratique,... Etant donné cette similarité, les conclusions issues de notre étude pourront servir de complément d'information à ce qui est décrit dans la littérature pour ce type de population.

Les mesures de force de préhension effectuées dans les deux groupes de sujets nous montrent que les grimpeurs produisent des intensités de force statistiquement plus importantes que celles des sujets du groupe contrôle ; ceci se justifie par les successions de contractions isométriques intermittentes à haute intensité en escalade.

Les tests isocinétiques nous montrent que dans la plupart des cas les grimpeurs développent des valeurs de PT/BW supérieures à celles de sujets ne pratiquant pas ce sport, à la fois pour les

extenseurs et pour les fléchisseurs en concentrique et en isométrique ; cette considération nous amène à penser que les extenseurs jouent probablement un rôle important dans la stabilisation du poignet contre le moment fléchissant des fléchisseurs profonds et superficiels des doigts. Les résultats de **Poulis et al. (2003)** nous poussent à croire que la supériorité isométrique des fléchisseurs du poignet est due, quant à elle, à une participation absolue plus importante des fléchisseurs des doigts chez les grimpeurs dans ce mouvement de flexion de poignet.

Cette implication importante des muscles fléchisseurs du poignet et des doigts pourrait être une cause possible de phénomènes de compression nerveuse à ce niveau (syndrome du canal carpien,..) dont parle près d'une étude sur cinq. Les intensités de forces (qualifiées d'hors normes par certains auteurs) développées par les fléchisseurs digitaux de ces sujets sont à l'origine de la plupart des mécanismes physiopathologiques décrits à ce propos dans la littérature.

Nous retiendrons aussi que les différences de valeurs de PT et de PT/BW n'aboutissent à aucune différence de ratio extenseurs/fléchisseurs entre les deux groupes de sujets testés. On en conclut donc d'après les valeurs tirées de cette étude que la pratique d'escalade à haut niveau n'induit aucune perturbation de la balance extenseurs/fléchisseurs du poignet pouvant être considérée comme génératrice de déséquilibres pathogènes au niveau tendineux. Ceci se justifie par l'absence quasi-totale de pathologies tendineuses du poignet rapportées dans la littérature.

Enfin, et de façon beaucoup plus générale, nous retiendrons que les valeurs de PT et de PT/BW sont significativement plus importantes en excentrique que dans les autres modes dans la plupart des cas. De plus il n'existe pas d'asymétries significatives, à quelques exceptions près, entre les deux côtés d'un même sujet pour la plupart des paramètres mesurés (quel que soit le groupe musculaire testé, le mode de contraction et le groupe de sujets).

Cette particularité nous a mené, au cours de ce travail, à discuter de la notion de latéralité et de la place qu'elle occupe dans un sport tel que l'escalade. En effet, les résultats ne montrant pas systématiquement de supériorités du côté dominant, nous concluons qu'il est difficile de donner à la latéralité le même sens en escalade que celui qu'elle peut avoir dans d'autres sports l'exploitant davantage (tennis, volley-ball...). Cette constatation se vérifie aussi dans les tests de force de préhension de la main, peut être plus spécifiques et plus représentatifs encore.

Pour clôturer ce travail, nous reviendrons sur le fait que cette étude présente de nombreuses imperfections (notamment sur le plan pratique) qu'il serait toutefois possible d'améliorer.

Ces imperfections donnent donc certaines limites aux conclusions qui y sont tirées.

Un matériel de fixation plus à même de limiter les compensations au niveau du coude permettrait probablement d'augmenter la reproductibilité des mesures au même terme qu'un système de préhension de la poignée de main plus ergonomique.

Il faut aussi mettre en avant le fait que les trois épreuves isocinétiques ont eu lieu dans le même ordre, donnant lieu à la possibilité d'un effet apprentissage et donc à des limites dans l'interprétation des comparaisons de résultats entre les tests. Enfin il est évident qu'un effectif plus important dans les deux échantillons donnerait plus de poids aux conclusions qui en sont tirées.

La plupart des études s'intéressant à l'escalade sont centrées sur les problèmes de la main et des doigts ; ce qui se justifie par la recrudescence de leurs lésions. Toutefois bon nombre de problèmes pour d'autres régions anatomiques telles que l'épaule, le coude ou encore le rachis apparaissent dans la littérature mais rien n'apparaît à ce sujet en terme d'évaluation biomécanique cherchant à mettre en évidence les raisons de ces problèmes. L'étude du comportement biomécanique de ces différents complexes articulaires au cours de mouvements types et l'étude de leurs répercussions à moyen terme sur l'appareil locomoteur complèterait les connaissances permettant de mieux prévenir ce type de lésions.

VI. BIBLIOGRAPHIE

1. **Abendroth-Smith J., Slauch R.** A kinematic and strength comparison of sport rock climbers. *Proceedings of 20st annual meeting of the American Society of Biomechanics, September 272-273, 1997.*
2. **Addiss D.G., Baker S.P.** Mountaineering and rock-climbing injuries in US national parks. *Ann Emerg Med 1989 Sep; 18(9): 975-9*
3. **Ashford RF, Nagelburg S, Adkins R.** Sensivity of the Jamar dynamometer in detecting submaximal grip effort. *J Hand Surg (Am) 1996 May; 21(3): 402-5*
4. **Astin A.D., Maury A., Karl H.E., Wojcik L.** Finger force capability: measurement and prediction using anthropometric and myoelectric measures. *Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Industrial and Systems Engineering, 1999, Blacksburg, Virginia.*
5. **Bath O.** Cours d'imagerie médicale. *HEPHO, Tournai.*
6. **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: 20-24*
7. **Binney D.M., Cochrane T.** Competitive rock climbing: physiological and anthropometric attributes. *University of Sheffield Centre of Sports Med*
8. **Bellace JV, Healy D, Besser MP, Byron T, Hohman L.** Validity of the Dexter Evaluation System's Jamar dynamometer attachment for assessment of handgrip strength in a normal population. *J Hand Ther 2000 Jan-Mar; 13 (1): 46-51*
9. **Biodex System 3 Pro Manual (#835-000) Applications/operations.** *Biodex Medical Systems, Inc. • 20 Ramsay Road • Box 702 • Shirley • New York • 11967-0702*

10. **Bollen S.R.** Injuries of the A2 pulley in rock climbers. *J Hand Surg [Br]* 1990 May; 15(2): 268-70
11. **Bollen SR.** Upper limb injuries in elite rock climbers. *J R Coll Edinb* 1990 Dec; 35(6 suppl): S18-20
12. **Bollen S.R, Gunson C.K.** Hand injuries in competition climbers. *Br J Sports Med* 1990 Mar; 24(1): 16-8
13. **Bollen SR, Wright V.** Radiographic changes in the hand of rock climbers. *Br J Sports Med* 1994 Sept; 28(3): 185-6
14. **Booth J., Marino F., Hill C., Gwinn T.** Energy of sport rock climbing in elite performers. *Br J Sports Med* 1999; 33: 14-18
15. **Bouilland S., Calmels P., Genty M., Griffon A., Heuleu J.N., Kerkour K., Middleton P., Pocholle M., Portero P., Rochcongar P., Rousseau B., Thoumie P., Vanvelcenaher J., Voisin P.** Les appareils d'isocinétisme en évaluation et en rééducation musculaire : intérêt et utilisation. *ANAES / Service évaluation des technologies – Service évaluation économique / Février 2001*
16. **Cartier J.L., Toussaint B., Darlot P., Henry J.P., Allieu Y., Bousquet G.** Approche d'une nouvelle pathologie de la main liée à la pratique de l'escalade. *J Traumatol Sport* 1985 ; 2 :35-39
17. **Chan K.M., Maffulli N.** Principles and practice of isokinetics in sports medicine and rehabilitation. *Williams & Wilkins, Hong Kong, 1996*
18. **Cornu C.,Maïetti O., Ledoux I.** Muscle elastic properties during wrist flexion and extension in healthy sedentary subjects and volley-ball players. *Int J Sport Med* 2003; 24: 277-284
19. **Croisier J.L., Crielaard J.M.** Exploration isocinétique: analyse des paramètres chiffrés. *Ann Réadaptation Méd Phys* 1999 ; 42 : 538-545

20. **Croisier J.L., Crielaard J.M.** Méthodes d'exploration de la force musculaire : une analyse critique. *Ann Réadaptation Méd Phys* 1999 ; 42 : 311-22
21. **Crosby C, Wehbé M., Mawr B.** Hand strength: normative values. *J Hand Surg (Am)* 1995; 19A: 665-670.
22. **Della Santa D.R, Kunz A.** Stress syndrome of the fingers related to rock climbers. *Schweiz Z Sportmed* 1990 Apr;38(1):5-9
23. **Diaporama** « Wrist biomechanics, most distal major articulation of the upper extremity »
auteur inconnu
24. **Doran D.A., Reay M.** Injury and associated training and performance characteristics in recreational climbers. *Research institute for sport and exercise sciences, Liverpool John Moores University, UK*
25. **Drouin J.M, Valovich T.C, Shultz S.J, Perrin D.H, Gansneder B.M.** Validity of the Biodex™ System 3 Pro isokinetic dynamometer position, torque and velocity measurements. *Free Communications, Poster Presentations: Reliability/Validity Journal of Athletic Training* S-103
26. **Dumontier C.** Examen clinique des traumatismes ligamentaires du poignet. Maîtrise orthopédique. *Accès via le site Internet*
27. **E.I.S.** The history of isokinetic: past, present, and future. *Scientific Board 2001(accès via Internet)*
28. **Feipel V., Dourdoufis M., Salvia P., Rooze M.** The use of medical imaging-based kinematic analysis in the evaluation of wrist function and outcome. *Hand Clin* 2003; 19: 401-409

29. **Fess EE.** Grip strength. In: *American society of Hand Therapists, ed. Clinical assessment recommendations. 2nd ed. Garner, NC: American Society of Hand Therapists; 1992.p. 41-45.*
30. **Forthomme B., Croisier J.L., Foidart-Dessalle M., Crielaard J.M.** Isokinetic assessment of the forearm and wrist muscles. *Isokinet Exerc Sci* 2002 ; 10 : 121-128
31. **Fraser A., Vallow J., Preston A., Cooper G.** Predicting " normal" grip strength for rheumatoid arthritis patients. *Rheumatol* 1999; 38:521-528
32. **Gabl M, Lener M, Pechlaner S, Judmaier W.** Isolated injuries of the pulley of the finger tendon sheath-Injuries in extreme rock climbing. *Sportverletz Sportschaden* 1992 Sep;6(3):119-22
33. **Gabl MR, Lener M, Pechlaner S, Lutz M, Rudish A.** Rupture or stress injury of the flexor tendon pulleys? Early diagnosis with MRI. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 1996 Nov;28(6):317-21
34. **Grant S., Shields C., Fitzpatrick V., Loh WM, Whitaker A., Watt I., Kay JW.** Climbing-specific finger endurance: a comparative study of intermediate rock climbers, rowers and aerobically trained individuals. *J Sports Sci* 2003 Aug ; 21(8) : 621-30
35. **Grant S., Hynes V., Whittaker A., Aitchison T.** Anthropometric, strength, endurance and flexibility characteristics of elite and recreational climbers. *J Sports Sci* 1996 ; 14(4): 301-9
36. **Gray H.** Anatomy of the human body. 1918
37. **Haidar S.G., Kumar D., Bassi R.S., Deshmukh S.C.** Average versus maximum grip strength: wich is more consistent? *J Hand Surg (Br)* 2004; 29 (1): 82-84
38. **Hamilton A., Balnave R., Adams R.** Grip strength testing reliability. *J Hand Ther* 1994 Jul-Sep; 7(3): 163-70

- 39. Härkönen R, Harju R, Alaranta H.** Accuracy of the Jamar dynamometer. *J Hand Ther* 1993; 6: 259-262.
- 40. Hazelton F.T., Smidt G.L., Flatt A.E., Stephens R.L.** The influence of wrist position on the force produced by the finger flexors. *J biomech* 1975; 8: 301-306
- 41. Heuck A, Hochholzer T, Keinath C.** MRT of the hand and wrist of sport climbers. Imaging of injuries and consequences of stress overload. *Radiologe* 1992 May; 32(5): 248-54
- 42. Hochholzer T, Heuck A, Krause R, Glas K.** Injuries and overuse disorders in sports climbers: 2 case reports. *Ther Umsch* 1993 Apr;50(4):263-7
- 43. Holtzhausen LM, Noakes TD.** Elbow, forearm, wrist, and hand injuries among sport rock climbers. *Clin J Sport Med* 1996;6(3):196-203
- 44. Human anatomy.net.** Accurate, interactive 3D anatomy.
- 45. Humphries D.** Diagnosis, management, and prevention of climbing injuries. *Medscape Orth Sports Med J* 1998; 2(6)
- 46. Imrhan, S. N.** Trends in finger pinch strength in children, adults, and the elderly. *Human Fact* 1989, 31(6), 689-701.
- 47. Inel NA, Ceceli E, Durukan PB, Erdem HR, Yorgancioglu ZR.** Grip strength: effect of hand dominance. *Singapore Med J* 2002 May; 43(5): 234-7
- 48. Jebson P.J.L., Steyers C.M.** Hand injuries in rock climbing: reaching the right treatment. *Phys Sportsmed* 1997 (25) 5
- 49. Johnson H., Nussbaum A.M., Babski-Reeves K.L., Smith-Jackson T.L.** Strength Capabilities and Subjective Limits for Repetitive Manual Insertion Tasks. *Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment*

of the requirements for the degree of Master of Science in Industrial and Systems Engineering, 2001, Blacksburg, Virginia

50. **Kamimura T., Ikuta Y.** Evaluation of grip strength with a sustained maximal isometric contraction for 6 and 10 seconds. *J Rehab Med* 2001; 33:225-229
51. **Kannus P.** Isokinetic evaluation of muscular performance: Implications for muscle testing and rehabilitation. *Int J Sport Med* 1994; 15: S11 - S18
52. **Kapandji I.A.** Physiologie articulaire Tome1. 5^{ème} édition. Editions Maloine
53. **Klauser A., Frauscher F., Bodner G., Halpern E.J., Schocke M.F., Springer P., Gabl M., Judmaier W., Nedden D.Z.** Finger pulley injuries in extreme rock climbers : depiction with dynamics US. *Radiology* 2002 ; 222 :755-761
54. **Koukoubis T.D., Cooper L.W., Glisson R.R., Seaber A.V., Feagin Ja.Jr.** An electromyographic study of arm muscles during climbing. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1995; 3(2): 121-4
55. **Largiarder U, Oelz O.** An analysis of overstrain injuries in rock climbing. *Schweiz Z Sportmed* 1993 Sep; 41(3): 107-14
56. **Lewis R.A., Shea O.F., Shea K.G.** Acute carpal tunnel syndrome ;wrist stress in a major climb. *Physician Sportsmed* 1993; 21 (5): 103-108
57. **Li M.Z., Flaherty M., Porco T., Nethery J.** The influence of wrist position on individual finger force production. *Department of Physical Therapy, Walsh University, North Canton, Ohio 44720*
58. **Marco R.A.W., Sharkey N.A., Smith T.S., Zissimos A.G.** Pathomechanics of closed rupture of the flexor tendon pulleys in rock climbers. *J Bone J Surg* 1998; 80-A (7): 1012-1019

- 59. Mathiowetz V.** Grip and pinch strength: Normative data for adults. *Arch of Phys Med Rehab* 1985; 66: 69-74.
- 60. Mathiowetz V, Weber K, Volland G, Kashman N.** Reliability and validity of grip and pinch strength evaluations. *J Hand Surg (Am)* 1984 Mar; 9(2): 222-6
- 61. Mermier CM., Robergs RA., McMinn SM, Heyward VH.** Energy expenditure and physiological responses during indoor rock climbing. *Br J Sport Med* 1997; 31(3): 224-8
- 62. Mohamad A Upal.** Analysis of complex in-vivo carpal bone motions. *Summer Bioengineering Conference, June 2003: 25-29, Sonesta Beach Resort in Key Biscayne, Florida.*
- 63. Moutet F., Guinard D., Corcella D., De Mourgues Ph.** La réparation des ruptures des poulies des fléchisseurs chez le grimpeur. *J Traumatol Sport* 1998 ; 15 : 221-224
- 64. Moutet F., Guinard P., Gerard P., Mugnier C.** Les ruptures sous cutanées des poulies des fléchisseurs des doigts longs chez les grimpeurs de haut niveau. *Ann Chir Main Memb Super* 1993 ; 12 :182-188
- 65. MSD Service.** Atlas anatomique : les principales articulations.
- 66. Mun Orthopedics.** Diaporama « Wrist biomechanics and carpal instability ». *Auteur inconnu*
- 67. Neu C.P., Crisco J.J., Wolfe S.W..** In vivo kinematic behavior of the radio-capitate joint during wrist flexion-extension and radio-ulnar deviation. *J Biomechanics* 2001; 34 (11): 1429-1438
- 68. Nordin M., Frankel V.H.** Basic biomechanics of the musculoskeletal system. *Lea & Febiger, Philadelphia, London, 2nd Edition, 1989*
- 69. Paige T.E., Fiore D.C., Houston J.D.** Injury in traditional and sport rock climbing. *Wilderness Environ Med* 1998; 9 (1): 2-7

- 70. Parzy O.** Rupture des poulies digitales opérées chez les grimpeurs de haut niveau : étude préalable à la construction d'un référentiel de l'intervention kinésithérapique. *Rapport de recherche en kinésithérapie en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat de Masseur-Kinésithérapeute et de la Maîtrise Ingénierie de la Santé (option Kinésithérapie)*, 2003.
- 71. Pequignot J.P., Duval M.A., Giordano P.** La main du grimpeur. Approche expérimentale et clinique. *Pathologie tendineuse de la main*, 174-18, 1989
- 72. Peolsson A, Hedlung R, Oberg B.** Intra- and inter-tester reliability and reference values for hand strength. *J Rehabil Med* 2001 ; 33(1): 36-41
- 73. Peters P.** Nerve compression syndromes in sport rock climbers. *Int J Sports Med* 2001; 22: 611-617
- 74. Petersen P, Petrick M, Connor H, Conklin D.** Grip strength and hand dominance: challenging the 10% rule. *Am J Occup Ther* 1989 ; 43(7):444-7
- 75. Poulis S., Rapanakis P., Pastra X., Poulis I., Soames R.W.** Force-velocity relationship of the wrist flexors and extensors: the influence of small and large handgrips. *Isokinet Exerc Sci* 2003 ; 11: 101-108
- 76. Quaine F., Vigouroux L., Martin L.** Effect of simulated rock climbing finger postures on force sharing among the fingers. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2003; 18(5): 385-8
- 77. Quaine F., Vigouroux L., Martin L.** Finger flexors fatigue in trained rock climbers and untrained sedentary subjects. *Int J Sports Med* 2003; 24: 424-427
- 78. Remy P.** Orthopédie traumatologie du membre supérieur. *HEPHO 2^{ème} édition*, 2002
- 79. Rohrbough J.T., Mudge M.K., Schilling R.C.** Overuse injuries in the elite rock climber. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (8): 1369-1372

- 80. Rooks M.D, Johnston R.B, Ensor C.D, Mc Intosh B., James S.** Injury patterns in recreational rock climbers. *Am J Sports Med* 1995 Nov-Dec; 23(6): 683-5
- 81. Rooks MD.** Rock climbing injuries. *Sports med* 1997 Apr; 23(4):261-70
- 82. Rouvière H.** Anatomie humaine descriptive, topographique et fonctionnelle, tome III : membres, système nerveux central. *Masson et cie éditeurs, 11^{ème} édition, 1974*
- 83. Saito I., Yonemasu K., Inami F.** Association of body mass index, body fat, and weight gain with inflammation markers among rural residents in Japan. *Circ J* 2003; 67: 323 –329
- 84. Schafer J., Gaultrapp H., Pforringer.** Acute and chronic overuse injuries in extreme sport-climbing. *Sporteverletz Sportschaden* 1998 Mar;12(1):21-5
- 85. Schreuders T.A., Roebroek M.E., Goumans J., Van Nieuwenhuijzen J.F., Stijnen T.H., Stam H.J.** Measurement error in grip and pinch force measurements in patients with hand injuries. *Phys Ther* 2003; 83 (9): 806-815
- 86. Schuind F.A., Mouraux D., Robert C., Brassinne E., Remy P., Salvia P., Meyer A., Moulart F., Burny F.** Functional and outcome evaluation of the hand and wrist. *Hand Clin* 2003; 19: 361-369
- 87. Schweizer A.** Biomechanical effectiveness of taping the A2 pulley in rock climbers. *J Hand Surg (Br&Eur)* 2000; 25B (1): 102-107
- 88. Schweizer A.** Biomechanical properties of the crimp grip position in rock climbers. *J Biomech* 2001; 34 (2) : 217-223
- 89. Schweizer A., Frank O., Ochsner P.E., Jacob H.A.C.** Friction between human finger flexor tendons and pulleys at high loads. *J Biomech* 2003 (36): 63-71
- 90. Shea KG, Shea OF, Meals RA.** Manual demands and consequences of rock climbing. *J Hand Surg [Am]* 1992 Mar;17(2):200-5

- 91. Sheel A.W., Seddon N., Knight A., McKenzie D.C., Warburton D.E.R.** Physiological responses to indoor rock climbing and their relationship to maximal cycle ergometry. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35 (7); 1225-1231
- 92. Stelzle F.D., Gaulrapp H., Pforringer W.** Injuries and overuse syndromes due to rock climbing on artificial walls. *Sportverletz Sportschaden* 2000; 14 (4): 128-33
- 93. Stoll T., Huber E., Seifert B., Michel B.A., Stucki G.** Maximal isometric muscle strength: normative values and gender specific relation to age. *Clin Rheumatol* 2000; 19: 105-113
- 94. Su CY, Lin JH, Cheng KF, Sung YT.** Grip strength in different positions of elbow and shoulder. *Arch Phys Med Rehabil* 1994 Jul; 75(7): 812-5
- 95. Tannheimer M., Thomas A., Gerngrob H.** Oxygen Saturation Course and Altitude Symptomatology During an Expedition to Broad Peak (8047 m). *Int J Sports Med* 2002 ;(23): 329–335
- 96. Trossman PB, Li P-W.** The effect of the duration of intertrial rest periods on isometric strength performance in young adults. *OccupTher J Res* 1989; 9: 362-378
- 97. Trudelle-Jackson.** Eccentric/concentric torque deficits in the quadriceps muscle. *J Orth Sports Phys Ther* 1989, 11, 142-145
- 98. Valovich T.C, Drouin J.M, Shultz S.J, Perrin D.H, Gansneder B.M.** Reliability of the Biodex™ System 3 Pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements. *Free Communications, Poster Presentations: Reliability/Validity Journal of Athletic Training* S-103
- 99. Warne W.J., Brooks D.** The Effect of Circumferential Taping on Flexor Tendon Pulley Failure in Rock Climbers. *Am J Sport Med* 2000; 28:674-678
- 100. Watts PB, Daggett M., Gallagher P., Wilkins B.** Metabolic response during sport rock climbing and the effects of active versus passive recovery. *Int J Sport Med* 2000; 21(3): 185-190

- 101. Watts P., Newburry V., Sulentic J.** Acute changes in handgrip strength, endurance, and blood lactate with sustained sport rock climbing. *J Sport Med Phys Fit* 36(4): 250-60, 1996 Dec
- 102. Watts P.B., Martin D.T., Durtschi S.** Anthropometric profiles of elite male and female competitive sport rock climbers. *J Sport Sci* 1993; 11(2) :113-7
- 103. Wyatt J.P., Mc Naughton G.W., Grant P.T.** A prospective study of rock climbing injuries. *Br J Sports Med* 1996 Jun; 30(2): 148-50