MINISTERE DE LA SANTE, REGION LORRAINE, INSTITUT LORRAIN DE FORMATION EN MASSO-KINESITHERAPIE DE NANCY.

INFLUENCE DE LA POSITION DU GENOU SUR LE GAIN DE FORCE DU QUADRICEPS AU COURS DU TRAVAIL STATIQUE INTERMITTENT.

Mémoire présenté par **Benjamin Labé**, étudiant en 3^{ème} année de masso-kinésithérapie, en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat de Masseur-Kinésithérapeute en 2015.

SOMMAIRE

RESUME

1.	IN	TROD	UCT	ION								1
	1.1.	Con	DUCTION1 ntexte									
	1.2.	Prol	bléma	tique								2
	1.3.	Revi	ue de	littératui	re							2
		1.3.1.	Spéc	cificité	du gain	de	force	musculai	re à	l'angle	articul	aire
			d'en	traîneme	ent							2
		1.3.2.	Méc	anismes	de la sp	écific	ité du	gain de j	force n	nusculaire	e à l'ai	ngle
	articulaire d'entraînement										4	
		1.3	.2.1.	Physio	logie du m	uscle.						4
		1.3	.2.2.	Anaton	nie du qua	dricep	S					4
	1.3.2.3.			Moment, force et bras de levier du quadriceps5								5
	1.3.2.4.							sculaires à	N=1			
				muscul	aire		•••••					6
	1.4.	Нура	othèse	?								.10
	1.5.	Obje	ctif									10
2.	MI	ETHOD	OLO	GIE								11
	2.1.	Popu	ılatioı	1	•••••							.11
	2.2.	Force	e mus	culaire	•••••							.11
		2.2.1.	Trav	ail statiq	ue intermi	ttent						.11
		2.2.	1.1.	Présent	ation							.12
		2.2.	1.2.	Force m	naximale m	esuré	e					.12
		2.2.	1.3.	Force m	naximale th	éoriq	ue et ép	reuve de fa	itigue			.13
	2	2.2.2.	Maté	riel et in	stallation							.13
	2.3. Volume musculaire						•••••			•••••		14
	2.4.	Pénil	bilité d	des épreu	ives de fati	gue						.14
3.	RE	SULTA	T					•••••				.15
	<i>3.1.</i>	Force	e mus	culaire								15
	<i>3.2.</i>	Volur	me mi	usculaire	?							17
	3.3.	Pénib	ilité d	les épreu	ives de fati	gue				•••••		.20

4. DISCUSSION21							
4.1. Force musculaire							
4.1.1. Quadriceps non dominant, entraîné							
4.1.1.1. Evolution de la force maximale mesurée en course interne21							
4.1.1.2. Evolution de la force maximale mesurée en course externe21							
4.1.1.3. Spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire							
d'entraînement21							
4.1.1.4. Conséquences pour la rééducation							
4.1.1.5. Evolution de la force maximale théorique au cours du protocole23							
4.1.2. Quadriceps dominant, non entraîné							
4.1.2.1. Renforcement musculaire isométrique croisé23							
4.1.2.2. Evolution de la force maximale mesurée en course interne24							
4.1.2.3. Evolution de la force maximale mesurée en course externe25							
4.1.2.4. Spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire							
d'entraînement25							
4.1.2.5. Conséquences pour la rééducation							
4.2. Volume musculaire							
4.3. Pénibilité des épreuves de fatigue27							
4.4. Contraintes articulaires 28							
4.4.1. <u>Contraintes fémoro-patellaires</u>							
4.4.1.1. Contrainte en compression							
4.4.2. <u>Contraintes fémoro-tibiales</u>							
4.4.2.1. Contrainte en compression							
4.4.2.2. Contrainte en cisaillement							
4.4.3. Conséquences pour la rééducation							
5. CONCLUSION30							
BIBLIOGRAPHIE							
ANNEXES							

RESUME.

L'objectif de notre étude est d'étudier l'influence de la position du genou sur le gain de force du quadriceps au cours du travail statique intermittent afin d'évaluer l'intérêt de réaliser le renforcement isométrique du quadriceps en course externe, alors qu'il est essentiellement proposé en course interne.

Vingt-cinq étudiants participent à cette étude et sont répartis dans les groupes CI, CE et CO. La force maximale mesurée des quadriceps non dominant et dominant, en courses interne et externe, des groupes CI, CE et CO, est évaluée au cours des première et sixième semaines de cette étude. La force maximale théorique du quadriceps non dominant du groupe CI, en course interne, et du groupe CE, en course externe, est déterminée au cours des deuxième, troisième, quatrième et cinquième semaines de cette étude au terme de chacune des épreuves de fatigue. Le groupe CI réalise les épreuves de fatigue avec le quadriceps non dominant en course interne, ce qui nous permet d'évaluer l'influence du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne sur la force maximale mesurée, non seulement du quadriceps non dominant, mais également du quadriceps dominant, en courses interne et externe. Le groupe CE réalise les épreuves de fatigue avec le quadriceps non dominant en course externe, ce qui nous permet d'évaluer l'influence du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe sur la force maximale mesurée, non seulement du quadriceps non dominant, mais également du quadriceps dominant, en courses interne et externe. Le groupe CO ne réalise pas les épreuves de fatigue, ce qui nous permet de vérifier que c'est bien le travail statique intermittent du quadriceps non dominant, en course interne ou externe, qui entraîne l'évolution de la force maximale mesurée des quadriceps non dominant et dominant, en courses interne et externe. Au début et à la fin de cette étude, nous mesurons également le périmètre des cuisses droite et gauche, à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de la base de la patella, de chacun des sujets des groupes CI, CE et CO. Enfin, nous proposons à chacun des sujets des groupes CI et CE d'apprécier la pénibilité ressentie au terme de chacune des épreuves de fatigue.

Les résultats de notre étude indiquent que le travail statique intermittent du quadriceps en course interne entraîne un gain de force, de ce quadriceps, spécifique à sa position d'entraînement, tandis que le travail statique intermittent du quadriceps en course externe entraîne un gain de force, de ce quadriceps, non spécifique à sa position d'entraînement. Ainsi, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé en course externe lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation optimale de la force de ce quadriceps, c'est-à-dire dans toute l'amplitude du genou, et que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé à un angle de flexion particulier du genou lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation spécifique de la force de ce quadriceps à cet angle de flexion du genou. Néanmoins, nous modérons ces propos en précisant que le thérapeute doit également tenir compte des contraintes en compression et en cisaillement s'exerçant sur les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale pour choisir, en fonction de la pathologie affectant le patient, l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps. De même, nous notons que les épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course interne semblent être mieux tolérées, ressenties moins pénibles, que celles réalisées avec le quadriceps en cours externe. Parce que nous observons que le périmètre de la cuisse du quadriceps entraîné en course externe augmente, alors que celui de la cuisse du quadriceps entraîné en course interne n'augmente pas, nous supposons que huit épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course interne induisent uniquement des adaptations nerveuses responsables de la spécificité du gain de force de ce quadriceps à sa position d'entraînement, alors que huit épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course externe induisent, en plus des adaptations nerveuses, des adaptations musculaires responsables de la non spécificité du gain de force de ce quadriceps à sa position d'entraînement. Les résultats de notre étude montrent également l'efficacité du renforcement musculaire isométrique croisé. Ainsi, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps controlatéral soit utilisé chaque fois qu'une pathologie et/ou qu'un traitement nous empêche d'utiliser le travail statique intermittent du quadriceps homolatéral.

Mots-clés : travail statique intermittent, force maximale mesurée, épreuve de fatigue, force maximale théorique, spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement, quadriceps, genou.

Keywords: specificity of isometric training, quadriceps, knee, muscle strength, joint angle.

1. INTRODUCTION.

1.1. Contexte.

Après qu'Hettinger et Müller prouvent, en 1953, son efficacité pour améliorer la force musculaire [1], l'entraînement isométrique devient une technique de renforcement musculaire reconnue du fait des avantages qu'elle présente, notamment sa simplicité d'utilisation, pour la rééducation des patients de tout âge, quelque soit leur condition physique, dans les hôpitaux et les cliniques. Elle est utilisée, par exemple, dans le cadre de la rééducation de la gonarthrose qui entraîne une marche, une montée et une descente des escaliers laborieuses du fait de la mise en place d'un cercle vicieux ; en effet, la douleur limite le patient dans ses activités, cette limitation favorise le déficit de mobilité articulaire et de force musculaire, notamment du quadriceps [2-3], et entretient la douleur. Le renforcement dynamique du quadriceps, risquant de provoquer la douleur à certains angles de flexion du genou arthrosique, est délaissé au profit du renforcement statique, réalisé soit à l'angle articulaire auquel la douleur est la moins forte, soit à l'angle articulaire auquel le muscle est le plus faible [3]. Alors que la plupart des études de recherche sont menées auprès de sujets sains [1-4-5-6-7-8-9], deux études de cas, menées auprès de sujets pathologiques, sur un homme pour l'une [2], sur une femme pour l'autre [3], tous deux affectés par une gonarthrose douloureuse, montrent l'efficacité du renforcement isométrique du quadriceps pour améliorer les capacités fonctionnelles à la marche et aux escaliers.

Mais, nous manquons encore de connaissances quant à l'influence de l'angle articulaire utilisé au cours de l'entraînement isométrique sur le gain de force musculaire aux autres angles articulaires; autrement dit, nous ne savons pas si le renforcement isométrique du quadriceps à un seul angle de flexion du genou est efficace pour augmenter la force du quadriceps aux autres angles de flexion du genou [1-2-3]. C'est pourquoi, alors que le renforcement isométrique du quadriceps a pour objectif de redonner au patient la possibilité de stabiliser et mobiliser son genou lors de la marche, ainsi que lors de la montée et de la descente des escaliers, l'amélioration des capacités fonctionnelles recherchée par le patient et

le thérapeute peut être décevante, en regard de leurs espérances, si la force du quadriceps n'augmente qu'à la position d'entraînement [3].

1.2. Problématique.

Le gain de force du quadriceps est-il spécifique à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent ? Comment évolue la force du quadriceps aux angles de flexion du genou autres que celui utilisé au cours du travail statique intermittent ?

1.3. Revue de littérature.

1.3.1. Spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement.

Lindh [4] conclut que le gain de force musculaire est spécifique à l'angle articulaire d'entraînement et suggère qu'il est nécessaire de réaliser le renforcement musculaire isométrique dans différentes positions pour garantir une augmentation optimale de la force musculaire, c'est-à-dire dans toute l'amplitude articulaire; mais, elle étudie l'influence du renforcement isométrique du quadriceps (avec quinze entraînements répartis sur cinq semaines), réalisé à 15° ou 60° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré à 15° et 60° de flexion du genou, soit à des angles articulaires peut-être trop éloignés l'un de l'autre pour qu'un quelconque transfert de gain de force puisse se produire entre eux. Au contraire, Marks [2-3], observant que le renforcement isométrique du quadriceps (avec dix-huit entraînements répartis sur six semaines), réalisé à 60° de flexion du genou, donc en course moyenne, est efficace pour augmenter son couple isométrique maximal à 30°, 60° et 90° de flexion du genou, donc à la fois en courses interne et externe, conclut que le gain de force musculaire n'est pas spécifique à l'angle articulaire d'entraînement et suggère qu'il n'est pas nécessaire de réaliser le renforcement musculaire isométrique dans différentes positions pour garantir une augmentation optimale de la force musculaire. Cependant, Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6], étudiant l'influence du renforcement isométrique du quadriceps (avec dix-huit entraînements répartis sur six semaines), réalisé à 45° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré à 0°, 15°, 45°, 75° et 90° de flexion du

genou, observent que son couple isométrique maximal n'augmente respectivement que de 15° à 45° et de 45° à 75° de flexion du genou.

Zaciorskij et Raizin [7], étudiant l'influence du renforcement isométrique du quadriceps (avec dix-huit entraînements répartis sur six semaines), réalisé à 50° ou 110° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré tous les 20° de 30° à 130° de flexion du genou, observent que son couple isométrique maximal augmente respectivement de 30° à 50° et de 30° à 130° de flexion du genou ; ils suggèrent que la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement est forte lorsque le muscle est renforcé en position raccourcie et, inversement, faible lorsque le muscle est renforcé en position allongée. Bandy et Hanten [1] ainsi que Kubo et coll. [8] présentent des résultats similaires ; les premiers, étudiant l'influence du renforcement isométrique du quadriceps (avec vingtquatre entraînements répartis sur huit semaines), réalisé à 30°, 60° ou 90° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré tous les 15° de 15° à 105° de flexion du genou, observent que son couple isométrique maximal augmente respectivement de 15° à 60°, de 15° à 75° et de 15° à 105° de flexion du genou ; les deuxièmes, étudiant l'influence du renforcement isométrique du quadriceps, réalisé à 50° ou 100° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré tous les 10° de 40° à 110° de flexion du genou, observent que son couple isométrique maximal augmente respectivement de 40° à 80° et de 40° à 110° de flexion du genou. Récemment, Noorkõiv et coll. [9], étudiant l'influence du renforcement isométrique du quadriceps, réalisé autour de 40° ou entre 85° et 90° de flexion du genou, sur son couple isométrique maximal, mesuré tous les 10° de 30° à 100° de flexion du genou, observent que son couple isométrique maximal augmente significativement de 30° à 50° de flexion du genou lorsqu'il est renforcé en position raccourcie, mais n'augmente significativement à aucun angle de flexion du genou lorsqu'il est renforcé en position allongée, les gains étant considérablement variables d'un sujet à l'autre.

Ainsi, le renforcement isométrique du quadriceps en course interne entraînerait un gain de force musculaire uniquement en course interne, tandis que le renforcement isométrique du quadriceps en course externe entraînerait un gain de force musculaire à la fois en course interne et en course externe.

1.3.2. <u>Mécanismes de la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement.</u>

1.3.2.1. Physiologie du muscle [10-11].

Un muscle est constitué de faisceaux de fibres musculaires, elles-mêmes constituées de myofibrilles; les myofibrilles sont constituées d'une succession de sarcomères, unités fonctionnelles du muscle, eux-mêmes constitués de myofilaments d'actine et de myosine, responsables de la contraction musculaire en glissant les uns sur les autres et en formant des ponts. Des aponévroses enveloppent les différentes structures musculaires: l'épimysium autour du muscle, le périmysium autour des faisceaux musculaires et l'endomysium autour des fibres musculaires; ils peuvent former un tendon et permettent l'insertion du muscle sur le périoste de l'os. Le muscle contient des vaisseaux sanguins et des fibres nerveuses.

Une unité motrice est constituée d'un motoneurone et des fibres musculaires qu'il innerve; les motoneurones de petite taille innervent des fibres musculaires lentes, tandis que les motoneurones de grande taille innervent des fibres musculaires rapides. Selon la loi d'Henneman, les unités motrices lentes sont recrutées en priorité, mais plus la contraction musculaire est intense et plus les unités motrices rapides sont également recrutées. La secousse musculaire est la réponse des fibres musculaires stimulées par un motoneurone par l'intermédiaire d'une impulsion électrique; la sommation spatiale et temporelle des impulsions électriques module l'intensité de la contraction musculaire.

1.3.2.2. Anatomie du quadriceps [12].

Le quadriceps, groupe musculaire de la loge antérieure de la cuisse, est constitué de quatre muscles innervés par une branche terminale du nerf fémoral issu des deuxième, troisième et quatrième racines nerveuses lombaires. Ses insertions proximales se trouvent sur l'épine iliaque antéro-supérieure et le sillon supra-acétabulaire de l'os coxal, ainsi que la face antérieure du grand trochanter du fémur, pour le droit fémoral, sur les deux tiers supérieurs des faces antérieure et latérale du corps du fémur pour le vaste intermédiaire, sur la lèvre médiale de la ligne âpre du bord postérieur du corps du fémur pour le vaste médial, sur

la lèvre latérale de la ligne âpre du bord postérieur du corps du fémur pour le vaste latéral. Ses insertions distales se trouvent sur la partie antérieure de la base de la patella et la tubérosité du tibia pour le droit fémoral, sur la partie postérieure de la base de la patella pour le vaste intermédiaire, sur la partie moyenne et médiale de la base, et le bord médial, de la patella, ainsi que les crêtes médiale et latérale du tibia, pour le vaste médial, sur la partie moyenne et latérale de la base, et le bord latéral, de la patella, ainsi que les crêtes latérale et médiale du tibia, pour le vaste latéral. Le tendon quadricipital naît des quatre muscles du quadriceps, et se termine sur la base et les bords de la patella. Le tendon patellaire relie l'apex de la patella à la tubérosité du tibia. Ses actions sont la flexion de la hanche et l'extension du genou pour le droit fémoral, l'extension du genou pour le vaste intermédiaire, l'extension et la rotation médiale du genou pour le vaste médial, l'extension et la rotation latérale du genou pour le vaste latéral.

1.3.2.3. Moment, force et bras de levier du quadriceps.

Le moment de la force (couple) que le quadriceps produit sur le genou dépend de son bras de levier et de sa force (tension) qui, elle-même, dépend de sa longueur [13]. Le bras de levier, la force et la longueur du quadriceps varient selon la position du genou [8-9]. Le plus haut niveau de couple isométrique développé par le quadriceps est observé à des angles de flexion du genou très variables en fonction des auteurs : à 30° selon Zaciorskij et Raizin [7], à 45° selon Yasuda et Sasaki [14], Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6], à 60° selon Marks [2-3] ainsi que Van Eijden et coll. [15], à 70° selon Noorkõiv et coll. [9], à 80° selon Kubo et coll. [8], et à 90° selon Bandy et Hanten [1].

La tension développée par le quadriceps correspond à la somme de ses tensions active et passive (présentées sur la figure 1) [16] :

• la première dépend du nombre de ponts formés par les myofilaments d'actine et de myosine; maximale lorsque le quadriceps est à sa longueur de repos, car les myofilaments d'actine et de myosine se chevauchent parfaitement, elle diminue d'autant plus que la longueur du quadriceps s'éloigne au-deçà ou au-delà de sa longueur de repos, car les sarcomères sont respectivement comprimés ou étirés, réduisant la possibilité de formation de ponts;

• la deuxième dépend de la mise en tension et de la viscoélasticité des tissus conjonctif et musculaire; minimale tant que la longueur du quadriceps est au-deçà de sa longueur de repos, elle augmente d'autant plus que la longueur du quadriceps s'éloigne au-delà de sa longueur de repos.

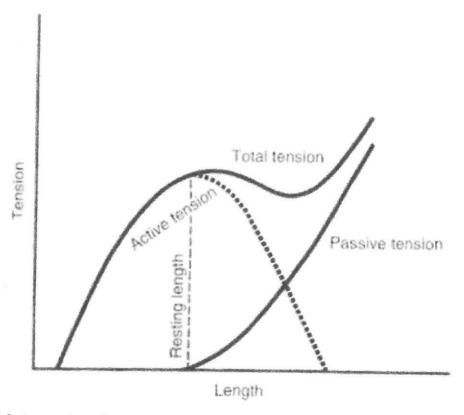


Figure 1: relation tension – longueur musculaire [16].

1.3.2.4. Adaptations nerveuses et musculaires à l'entraînement de la force musculaire.

Bien qu'il soit admis que les adaptations nerveuses entraînent un gain de force musculaire sur une amplitude articulaire limitée autour de la position d'entraînement et que les adaptations musculaires, au contraire, entraînent un gain de force musculaire sur une amplitude articulaire plus ou moins complète, les mécanismes influençant la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement sont encore peu connus et mal compris [1-2-3-5-6-8-9].

Le renforcement musculaire génère une augmentation de la force musculaire grâce aux adaptations nerveuses (amélioration de la coordination intramusculaire et intermusculaire) et/ou musculaires (augmentation du volume, ou hypertrophie, musculaire) qu'il provoque [11-17-18] :

- l'amélioration de la coordination intramusculaire est liée à l'amélioration du recrutement spatial et temporel des unités motrices, ainsi qu'à l'amélioration de leur synchronisation;
- l'amélioration de la coordination intermusculaire est liée à l'amélioration de la coordination entre les muscles agonistes et antagonistes, ainsi qu'à l'amélioration des stratégies d'activation musculaire;
- l'hypertrophie musculaire est liée à :
 - o l'augmentation de la quantité et de la qualité du tissu conjonctif;
 - o l'augmentation de la vascularisation par l'augmentation du nombre de capillaires sanguins ;
 - l'augmentation de la surface de section du muscle par l'augmentation du nombre (hyperplasie) de myofibrilles (augmentation du nombre de sarcomères en parallèle) et de fibres musculaires, et de leur surface de section;
 - l'augmentation de la longueur du muscle par l'augmentation de la longueur des myofibrilles (augmentation du nombre de sarcomères en série) et des fibres musculaires en fonction de la position dans laquelle le muscle est renforcé;
- si, en théorie, la transformation des fibres musculaires de type 1 (peu fatigables, mais avec une contraction lente et faible) en fibres musculaires de type 2 (très fatigables, mais avec une contraction rapide et forte) est possible, elle ne l'est pas, en pratique, du fait de la prédominance des activités quotidiennes par rapport au temps consacré à l'entraînement de la force.

Si les adaptations musculaires interviennent tardivement, les adaptations nerveuses interviennent précocement au cours de la période d'entraînement de la force musculaire ; elles entraînent une spécificité du gain de force musculaire au type de contraction musculaire (concentrique, isométrique ou excentrique), à la position d'entraînement (angle articulaire et longueur musculaire) si le renforcement musculaire est réalisé sur un mode statique, à la

vitesse d'entraînement si le renforcement musculaire est réalisé sur un mode dynamique [17-18]. Les adaptations nerveuses entraînent une augmentation de la force musculaire volontaire sans augmentation, ni de la force musculaire involontaire induite par stimulation électrique supramaximale, ni du volume musculaire; l'activité électrique des muscles agonistes augmente et/ou celle des muscles antagonistes diminue [17-18].

Bandy et Hanten [1] observent que le renforcement isométrique du quadriceps, réalisé à 30°, 60° ou 90° de flexion du genou, entraîne une augmentation de l'activité électrique du vaste médial, du vaste latéral et du droit fémoral, mesurée tous les 15° de 15° à 105° de flexion du genou, respectivement de 15° à 60°, de 30° à 90° et de 30° à 105° de flexion du genou. Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6] observent que le renforcement isométrique du quadriceps, réalisé à 45° de flexion du genou, n'entraîne pas d'augmentation de l'activité électrique des vastes médial et latéral, mesurée à 0°, 15°, 45°, 75° et 90° de flexion du genou ; ils supposent qu'une augmentation de l'activation de muscles agonistes (du vaste intermédiaire et/ou du droit fémoral) et/ou qu'une diminution de la co-activation de muscles antagonistes, essentiellement des ischio-jambiers (du semi-tendineux, du semi-membraneux et/ou du biceps fémoral), sont susceptibles de se produire à la position d'entraînement. Kubo et coll. [8] observent que le renforcement isométrique du quadriceps, réalisé à 50° ou 100° de flexion du genou, entraîne une augmentation de l'activité électrique du vaste médial, du vaste latéral et du droit fémoral, mesurée tous les 10° de 40° à 110° de flexion du genou, à chacun de ces angles, mais n'entraîne une diminution de l'activité électrique du biceps fémoral, mesurée tous les 10° de 40° à 110° de flexion du genou, à aucun de ces angles. Noorkõiv et coll. [9] observent, d'une part, que le renforcement isométrique du quadriceps, réalisé en position raccourcie, entraîne une augmentation de l'activité électrique du vaste médial et du vaste latéral, mesurée tous les 10° de 30° à 100° de flexion du genou, respectivement de 30° à 100° et de 40° à 50° de flexion du genou, mais n'entraîne ni augmentation de l'activité électrique du droit fémoral, ni diminution de l'activité électrique du semi-tendineux et du biceps fémoral, mesurées tous les 10° de 30° à 100° de flexion du genou; ils observent, d'autre part, que le renforcement isométrique du quadriceps, réalisé en position allongée, entraîne une augmentation de l'activité électrique du vaste latéral et du droit fémoral, mesurée tous les 10° de 30° à 100° de flexion du genou, respectivement de 30° à 100° et de 50° à 80° de flexion du genou, mais n'entraîne ni augmentation de l'activité électrique du vaste médial,

ni diminution de l'activité électrique du semi-tendineux et du biceps fémoral mesurées tous les 10° de 30° à 100° de flexion du genou.

Kubo et coll. [8] ainsi que Noorkõiv et coll. [9] choisissent de comparer l'influence du renforcement musculaire isométrique à deux angles de flexion du genou pour lesquels le quadriceps développe le même niveau de couple ; parce que le bras de levier du quadriceps est plus important lorsque le genou est tendu que lorsqu'il est fléchi, la force du quadriceps et la contrainte mécanique qui lui est imposée sont, en conséquence, plus importantes lorsque le genou est fléchi que lorsqu'il est tendu. Bien qu'il soit admis que la contrainte mécanique stimule l'hypertrophie musculaire, Kubo et coll. [8] observent que le volume de chacun des muscles du quadriceps renforcé en position raccourcie augmente autant que celui de chacun des muscles du quadriceps renforcé en position allongée ; par contre, la raideur du tendon quadricipital du quadriceps renforcé en position allongée augmente, alors que celle du tendon quadricipital du quadriceps renforcé en position raccourcie n'augmente pas ; ils suggèrent que l'augmentation de la raideur du tendon quadricipital du quadriceps renforcé en position allongée contribue à l'augmentation de la force de ce quadriceps en position raccourcie. Noorkõiv et coll. [9] observent que le renforcement isométrique du quadriceps en position raccourcie n'entraîne aucune augmentation du volume musculaire, tandis que le renforcement isométrique du quadriceps en position allongée entraîne une augmentation du volume du vaste médial, dans ses portions proximale et distale, du vaste latéral, dans sa portion moyenne, et du droit fémoral, dans ses portions proximale, moyenne et distale, mais n'entraîne aucune augmentation du volume du vaste intermédiaire. Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6] suggèrent qu'à chaque angle de flexion du genou, certains muscles du quadriceps qui présentent un avantage mécanique par rapport aux autres sont davantage sollicités et voient leur nombre de sarcomères augmenter; l'hypertrophie musculaire contribuerait donc à la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement

Ainsi, le renforcement isométrique du quadriceps entraînerait des adaptations nerveuses et musculaires, notamment du tissu conjonctif, responsables de la spécificité ou de la non spécificité du gain de force du quadriceps à sa position d'entraînement. L'augmentation de l'activation de muscles agonistes, la diminution de la co-activation de

muscles antagonistes et l'augmentation du volume de certaines portions de certains muscles seraient responsables de la spécificité, plus ou moins importante, du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement. Au contraire, l'augmentation de la quantité et de la qualité (raideur) du tissu conjonctif seraient responsables de la non spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement.

1.4. Hypothèse.

Le travail statique intermittent du quadriceps en course interne, c'est-à-dire en position raccourcie, entraînerait un gain de force, de ce quadriceps, spécifique à sa position d'entraînement, tandis que le travail statique intermittent du quadriceps en course externe, c'est-à-dire en position allongée, entraînerait un gain de force, de ce quadriceps, non spécifique à sa position d'entraînement.

Ainsi, imaginons qu'un patient présentant des difficultés à la marche, à la montée et à la descente des escaliers du fait d'un déficit de force d'un de ses quadriceps, se voit proposer un renforcement isométrique de ce quadriceps; si l'hypothèse émise se vérifie, un renforcement isométrique de ce quadriceps:

- en course interne entraînerait un gain de force musculaire uniquement en course interne, donc sur une amplitude articulaire limitée, ce qui fait que le patient améliorerait son autonomie à la marche, mais ne l'améliorerait pas aux escaliers ;
- en course externe entraînerait un gain de force musculaire à la fois en course interne et en course externe, donc sur une amplitude articulaire plus ou moins complète, ce qui fait que le patient améliorerait son autonomie à la marche et aux escaliers.

1.5. Objectif.

En étudiant l'influence de la position du genou sur le gain de force du quadriceps au cours du travail statique intermittent, nous souhaitons évaluer l'intérêt de réaliser le renforcement isométrique du quadriceps en course externe, alors qu'il est essentiellement

proposé en course interne. Notre objectif est d'apporter des connaissances directement et facilement applicables afin d'optimiser la rééducation.

2. METHODOLOGIE.

2.1. Population.

Vingt-cinq étudiants (présentés dans le tableau 1 de l'annexe 1) de l'Institut Lorrain de Formation en Masso-Kinésithérapie de Nancy, en bonne santé, ayant une activité physique faible à modérée, participent à cette étude ; ils sont répartis aléatoirement dans trois groupes :

- un groupe CI, constitué de huit femmes et d'un homme âgés de 21,3 ± 0,7 ans, qui nous permet d'étudier l'influence du travail statique intermittent du quadriceps en course interne sur la force maximale mesurée de ce quadriceps en courses interne et externe;
- un groupe CE, constitué de huit femmes et d'un homme âgés de 21,2 ± 3,4 ans, qui nous permet d'étudier l'influence du travail statique intermittent du quadriceps en course externe sur la force maximale mesurée de ce quadriceps en courses interne et externe;
- un groupe CO, constitué de quatre femmes et de trois hommes âgés de 19,9 ± 0,9 ans, qui nous permet de vérifier que c'est bien le travail statique intermittent du quadriceps, en course interne ou externe, qui entraîne l'évolution de la force maximale mesurée du quadriceps, en courses interne et externe.

Ne sont inclus dans l'étude ni les sujets ayant une pathologie affectant le genou et/ou le quadriceps, ni les sujets ayant une activité physique intense influençant les résultats. Sont exclus de l'étude, tous sujets ne respectant pas scrupuleusement le protocole.

2.2. Force musculaire.

2.2.1. Travail statique intermittent.

2.2.1.1. Présentation [19-20-21].

Il débute, au cours de la première séance, par la détermination de la force maximale mesurée qui est la force maximale que le sujet est capable de développer pendant un temps infime; la force maximale mesurée se détermine directement à l'aide, par exemple, d'un dynamomètre. Il se poursuit, à partir de la deuxième séance, par la détermination de la force maximale théorique qui est la force maximale que le sujet serait capable de développer pendant un temps nul ; à la suite d'une épreuve de fatigue, la force maximale théorique se détermine indirectement à l'aide d'une abaque (présentée dans le tableau 2 de l'annexe 2) en fonction du poids utilisé et du nombre de répétitions réalisées. L'épreuve de fatigue se caractérise par une succession de phases de travail et de repos ; l'intensité de travail ainsi que le ratio entre les temps de travail et de repos peuvent être modulés en fonction de l'état clinique du patient et de l'objectif de la séance : une intensité de travail faible avec un temps de travail long et un temps de repos court favorisent le développement de l'endurance musculaire, tandis qu'une intensité de travail forte avec un temps de travail court et un temps de repos long favorisent le développement de la force musculaire. Troisier et Chauvin proposent d'utiliser, pour l'épreuve de fatigue, des temps de travail et de repos de 6 sec, ainsi qu'une intensité de travail comprise entre 50 % et 80 % de la force maximale mesurée puis théorique, ce que nous respectons dans cette étude.

2.2.1.2. Force maximale mesurée.

La force maximale mesurée des quadriceps droit et gauche à 30° de flexion du genou, donc en course interne, et à 90° de flexion du genou, donc en course externe, de chacun des sujets des groupes CI, CE et CO, sont évaluées au cours de deux séances distinctes la semaine précédent puis la semaine suivant la période d'entraînement (visibles en semaines 1 et 6 du calendrier de l'annexe 3) :

· quadriceps droit:

 échauffement : 2 séries de 5 contractions isométriques inframaximales de 6 sec avec 6 sec de récupération après les contractions et 1 min après les séries ;

- détermination de la force maximale mesurée : 1 série de 3 contractions isométriques maximales de 1 sec avec 59 sec de récupération après les contractions;
- récupération : 3 min ;
- quadriceps gauche :
 - o échauffement : 2 séries de 5 contractions isométriques inframaximales de 6 sec avec 6 sec de récupération après les contractions et 1 min après les séries ;
 - o détermination de la force maximale mesurée : 1 série de 3 contractions isométriques maximales de 1 sec avec 59 sec de récupération après les contractions.

2.2.1.3. Force maximale théorique et épreuve de fatigue.

Huit épreuves de fatigue, réparties équitablement sur quatre semaines (visibles en semaines 2 à 5 du calendrier de l'annexe 3), sont réalisées avec le quadriceps non dominant par chacun des sujets du groupes CI, à 30° de flexion du genou, et du groupe CE, à 90° de flexion du genou :

- échauffement : 1 série de 10 contractions isométriques inframaximales de 6 sec avec 6 sec de récupération après les contractions et 2 min après la série ;
- épreuve de fatigue : 1 série de contractions isométriques de 6 sec à 65 % de la force maximale mesurée puis théorique avec 6 sec de récupération après les contractions, jusqu'à épuisement ;
- la force maximale théorique : déterminée au terme de chacune des épreuves de fatigue.

2.2.2. Matériel et installation.

Nous utilisons un banc de Colson, un dynamomètre (un moniteur programmable avec feedback visuel et sonore, un capteur de force avec une chaînette et trois manilles), une sangle de traction, une suspension (une élingue), un coussin triangulaire, une sangle de maintien et un goniomètre. Le sujet s'assoit sur le banc de Colson et nous réglons l'assise; nous plaçons le coussin triangulaire sous la partie inférieure de la cuisse du sujet pour l'horizontaliser et la

sangle de maintien sur la partie supérieure des cuisses du sujet pour les stabiliser; nous plaçons la sangle de traction au niveau de l'extrémité inférieure de la jambe du sujet; nous fixons une extrémité de l'élingue sur la partie antérieure de la sangle de traction et l'autre extrémité sur le montant antéro-supérieur du banc de Colson pour suspendre la jambe du sujet (uniquement pour positionner le quadriceps en course interne); nous fixons le capteur de force sur la partie postérieure de la sangle de traction, une extrémité de la chaînette sur le capteur de force et l'autre extrémité sur le montant antéro-inférieur (pour positionner le quadriceps en course interne) ou postérieur (pour positionner le quadriceps en course externe) du banc de Colson; nous positionnons le genou à 30° ou 90° de flexion à l'aide du goniomètre, et en ajustant la longueur de l'élingue et de la chaînette. Le matériel et l'installation sont visibles sur les photos de l'annexe 4.

2.3. Volume musculaire.

Pour mettre en évidence les mécanismes de la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement, nous proposons de mesurer le périmètre des cuisses droite et gauche de chacun des sujets des groupes CI, CE et CO. Le sujet s'allonge sur une table de masso-kinésithérapie; nous plaçons un coussin triangulaire sous la partie supérieure de la jambe de façon à ce que la cuisse ne repose pas sur la table; à l'aide d'un mètre-ruban et d'un crayon dermographique, nous traçons des repères 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm au-dessus de la base de la patella, puis nous mesurons les périmètres de la cuisse en plaçant le mètre-ruban successivement au-dessous de chacun des repères. La périmétrie est réalisée au début, et non à la fin, pour ne pas tenir compte de l'augmentation transitoire du volume musculaire par l'augmentation de l'apport sanguin suite à l'effort musculaire, des séances 1 et 11.

2.4. Pénibilité des épreuves de fatigue.

Pour évaluer la tolérance aux épreuves de fatigue en fonction de la position d'entraînement, nous proposons à chacun des sujets des groupes CI et CE d'apprécier la pénibilité ressentie au terme de chacune des épreuves de fatigue à l'aide d'une échelle numérique allant de 0 point, si elle est minimale, à 10 points, si elle est maximale.

3. RESULTAT.

3.1. Force musculaire.

La force maximale mesurée, initiale et finale, des quadriceps non dominant et dominant, en courses interne et externe, des groupes CI, CE et CO, et leur évolution, sont présentées et comparées dans les tableaux 3 à 26 de l'annexe 5 ainsi que sur les figures 2 à 4. Le poids utilisé et le nombre de répétitions réalisées par les groupes CI et CE lors des épreuves de fatigue sont indiqués dans les tableaux 27 et 28 de l'annexe 5. La force maximale mesurée et la force maximale théorique du quadriceps non dominant du groupe CI, en course interne, et du groupe CE, en course externe, et leur évolution, sont présentées et comparées dans les tableaux 29 à 33 de l'annexe 5 ainsi que sur la figure 5.

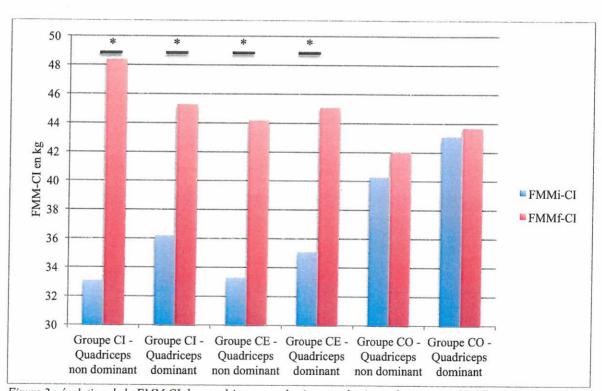


Figure 2 : évolution de la FMM-CI des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO.

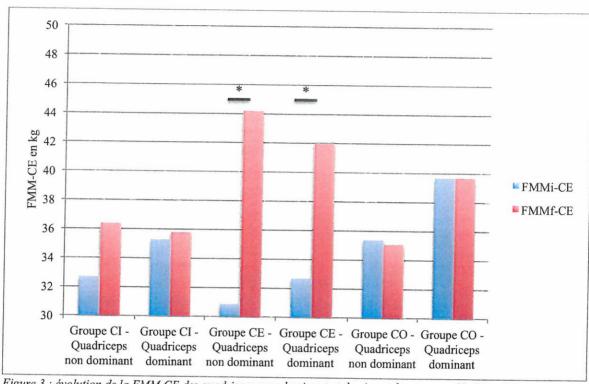


Figure 3 : évolution de la FMM-CE des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO.

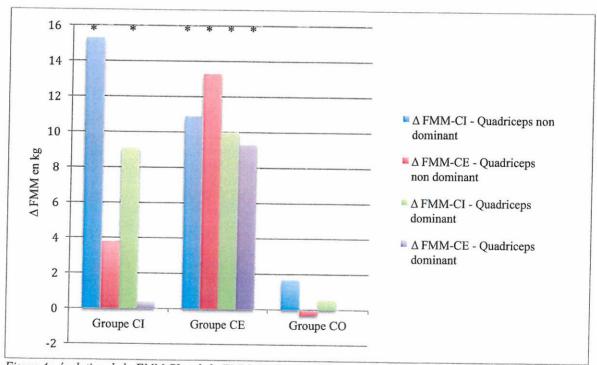


Figure 4 : évolution de la FMM-CI et de la FMM-CE des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO.

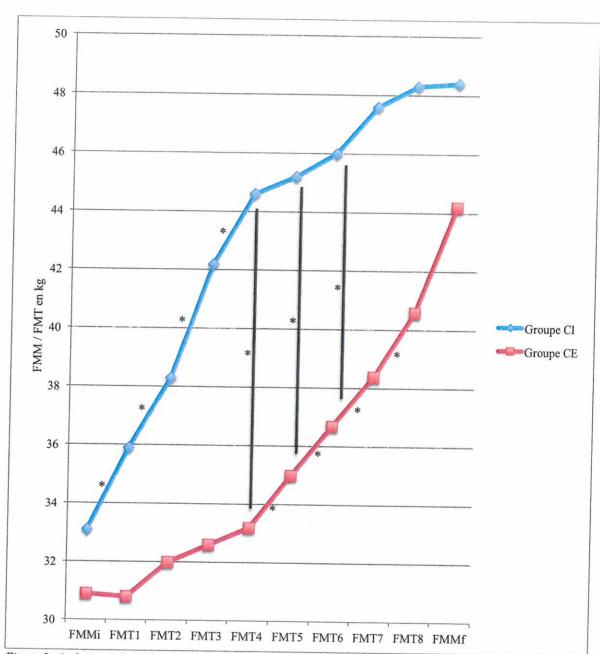


Figure 5 : évolution de la FMM et de la FMT des groupes CI et CE.

3.2. Volume musculaire.

Le périmètre des cuisses des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO, et leur évolution, sont présentées et comparées dans les tableaux 34 à 69 de l'annexe 5 ainsi que sur les figures 6 à 10.

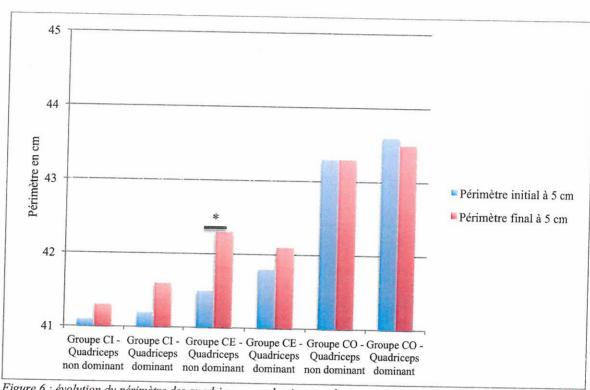


Figure 6 : évolution du périmètre des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

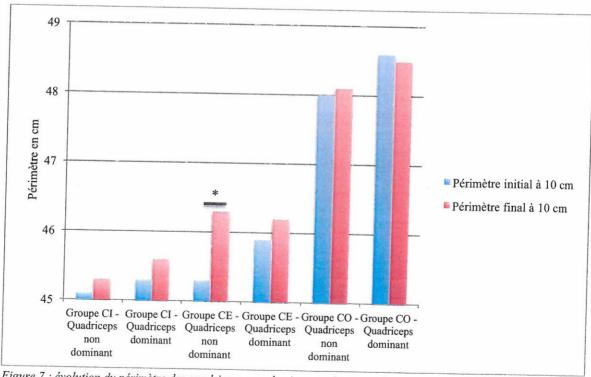


Figure 7 : évolution du périmètre des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

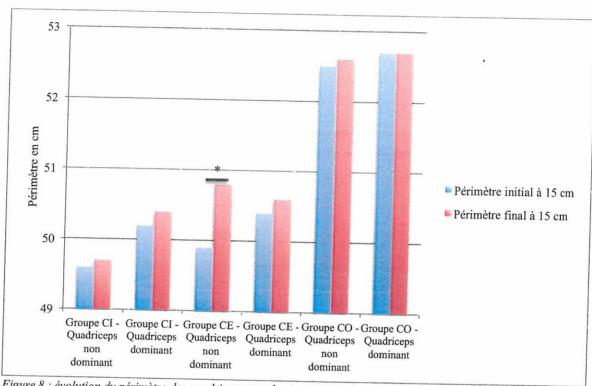


Figure 8 : évolution du périmètre des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

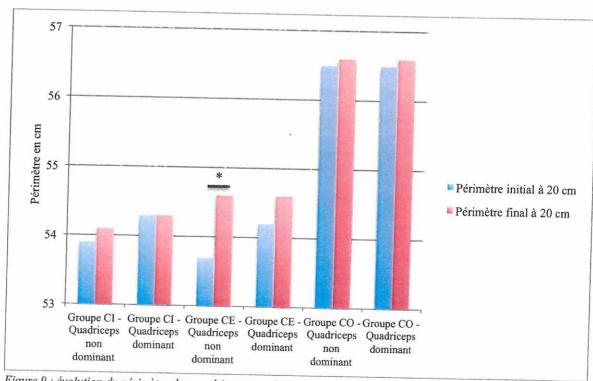


Figure 9 : évolution du périmètre des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO à 20 cm.

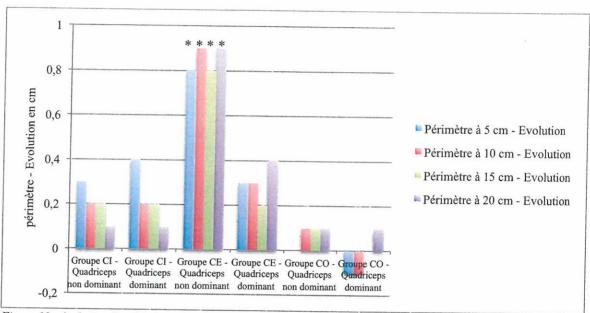


Figure 10 : évolution du périmètre des quadriceps non dominant et dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm.

3.3. Pénibilité des épreuves de fatigue.

La pénibilité ressentie lors des épreuves de fatigue par les groupes CI et CE est présentée et comparée dans les tableaux 70 à 72 de l'annexe 7 ainsi que sur la figure 11.

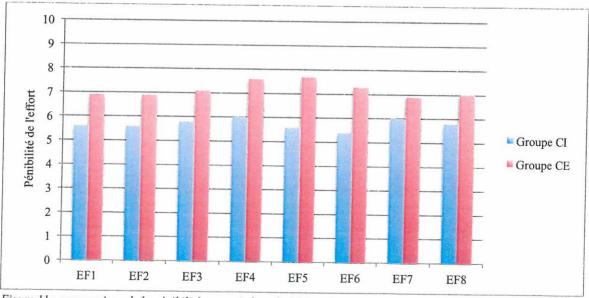


Figure 11 : comparaison de la pénibilité ressentie lors des EF par les groupes CI et CE.

4. DISCUSSION.

4.1. Force musculaire.

4.1.1. Quadriceps non dominant, entraîné.

4.1.1.1. Evolution de la force maximale mesurée en course interne.

La force maximale mesurée du quadriceps non dominant en course interne des groupes CI et CE augmente significativement, et significativement plus que celle du quadriceps non dominant en course interne du groupe CO qui n'augmente pas. La force maximale mesurée du quadriceps non dominant en course interne du groupe CI n'augmente pas significativement plus que celle du quadriceps non dominant en course interne du groupe CE. Ainsi, le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est aussi efficace que celui du quadriceps non dominant en course interne pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps non dominant en course interne.

4.1.1.2. Evolution de la force maximale mesurée en course externe.

La force maximale mesurée du quadriceps non dominant en course externe du groupe CE augmente significativement, et significativement plus que celle du quadriceps non dominant en course externe des groupes CI et CO qui n'augmente pas. Ainsi, le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est plus efficace que celui du quadriceps non dominant en course interne pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps non dominant en course externe.

4.1.1.3. Spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement.

Nous observons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne est efficace pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps non

dominant en course interne, mais ne l'est pas pour augmenter celle du quadriceps non dominant en course externe; nous suggérons que le gain de force du quadriceps non dominant est spécifique à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne. Au contraire, nous observons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est efficace pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps non dominant en courses interne et externe; nous suggérons que le gain de force du quadriceps non dominant n'est pas spécifique à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe.

Nous supposons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne entraîne des adaptations nerveuses et musculaires responsables de la spécificité du gain de force du quadriceps non dominant à sa position d'entraînement (augmentation de l'activation de muscles agonistes, diminution de la co-activation de muscles antagonistes, augmentation du volume de certaines portions de certains muscles). Nous supposons également que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe entraîne des adaptations nerveuses et musculaires responsables de la non spécificité du gain de force du quadriceps non dominant à sa position d'entraînement (augmentation de l'activation de muscles agonistes, diminution de la co-activation de muscles antagonistes, augmentation du volume de certaines portions de certains muscles, augmentation de la quantité et de la raideur du tissu conjonctif).

4.1.1.4. Conséquences pour la rééducation.

Les résultats obtenus sont en accord avec l'hypothèse émise, et avec les résultats obtenus par Zaciorskij et Raizin [7], Bandy et Hanten [1], Kubo et coll. [8] ainsi que Noorkõiv et coll. [9] qui observent que la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement est forte lorsque le muscle est renforcé en course interne et faible lorsque le muscle est renforcé en course externe.

D'une part, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé en course externe lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation

optimale de la force du quadriceps, c'est-à-dire dans toute l'amplitude du genou ; d'autre part, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé à un angle de flexion particulier du genou lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation spécifique de la force du quadriceps à cet angle de flexion du genou.

4.1.1.5. Evolution de la force maximale théorique au cours du protocole.

La force maximale théorique du quadriceps non dominant n'évolue pas au même rythme en ce qui concerne le groupe CI, en course interne, et le groupe CE, en course externe, puisque le premier améliore sa force maximale théorique essentiellement au cours de la première moitié du protocole, alors que le deuxième l'améliore essentiellement au cours de la deuxième moitié. Parce que la force du quadriceps et la contrainte mécanique qui lui est imposée sont plus importantes lors de sa contraction isométrique maximale en course externe que lors de sa contraction isométrique maximale en course interne [8-9], nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps en course externe exige une période d'adaptation et un temps de récupération plus importants que celui du quadriceps en course interne.

4.1.2. Quadriceps dominant, non entraîné.

4.1.2.1. Renforcement musculaire isométrique croisé.

Nous parlons de renforcement isométrique croisé du quadriceps pour désigner une technique qui consiste à renforcer un quadriceps en vue d'obtenir un gain de force du quadriceps opposé. Dans leur étude respective, Komi et coll. [22], Carolan et Cafarelli [23], Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6] étudient l'efficacité du renforcement isométrique croisé du quadriceps et cherchent à mettre en évidence les adaptations nerveuses susceptibles d'intervenir, notamment grâce à la plasticité du système nerveux.

Komi et coll. [22] observent que le renforcement isométrique du quadriceps droit (avec quarante-huit entraînements répartis sur douze semaines), réalisé à 60° de flexion du genou, entraîne une augmentation du couple isométrique maximal du quadriceps gauche, mesuré à 60° de flexion du genou. De même, Carolan et Cafarelli [23] observent que le

renforcement isométrique du quadriceps dominant (avec vingt-quatre entraînements répartis sur huit semaines), réalisé à 90° de flexion du genou, entraîne une augmentation du couple isométrique maximal du quadriceps non dominant, mesuré à 90° de flexion du genou. Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6] étudient l'influence du renforcement isométrique du quadriceps droit, réalisé à 45° de flexion du genou, sur le couple isométrique maximal du quadriceps gauche, mesuré à 0°, 15°, 45°, 75° et 90° de flexion du genou; dans la première étude, le couple isométrique maximal du quadriceps gauche augmente de 15° à 45° de flexion du genou, le gain de force du quadriceps gauche est spécifique à la position d'entraînement du quadriceps droit; cependant, dans la deuxième étude, le couple isométrique maximal du quadriceps gauche n'augmente pas.

Komi et coll. [22] observent que le renforcement isométrique du quadriceps droit, réalisé à 60° de flexion du genou, n'entraîne pas d'augmentation de l'activité électrique du droit fémoral gauche, mesurée à 60° de flexion du genou. De même, Weir et coll. [5] ainsi que Weir et coll. [6] observent que le renforcement isométrique du quadriceps droit, réalisé à 45° de flexion du genou, n'entraîne pas d'augmentation de l'activité électrique des vastes médial et latéral gauches, mesurée à 0°, 15°, 45°, 75° et 90° de flexion du genou; ils supposent néanmoins qu'une augmentation de l'activation de muscles agonistes (du vaste intermédiaire et/ou du droit fémoral) et/ou qu'une diminution de la co-activation de muscles antagonistes, essentiellement des ischio-jambiers (du semi-tendineux, du semi-membraneux et/ou du biceps fémoral), sont susceptibles de se produire à la position d'entraînement. D'ailleurs, Carolan et Cafarelli [23] observent que le renforcement isométrique du quadriceps dominant, réalisé à 90° de flexion du genou, n'entraîne pas d'augmentation de l'activité électrique du vaste latéral non dominant, mesurée à 90° de flexion du genou, mais entraîne une diminution de l'activité électrique du biceps fémoral non dominant, mesurée à 90° de flexion du genou.

4.1.2.2. Evolution de la force maximale mesurée en course interne.

La force maximale mesurée du quadriceps dominant en course interne des groupe CI et CE augmente significativement, et significativement plus que celle du quadriceps dominant en course interne du groupe CO qui n'augmente pas. La force maximale mesurée du

quadriceps dominant en course interne du groupe CI n'augmente pas significativement plus que celle du quadriceps dominant en course interne du groupe CE. Ainsi, le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est aussi efficace que celui du quadriceps non dominant en course interne pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps dominant en course interne.

4.1.2.3. Evolution de la force maximale mesurée en course externe.

La force maximale mesurée du quadriceps dominant en course externe du groupe CE augmente significativement, et significativement plus que celle du quadriceps dominant en course externe des groupe CI et CO qui n'augmente pas. Ainsi, le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est plus efficace que celui du quadriceps non dominant en course interne pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps dominant en course externe.

4.1.2.4. Spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement

Nous observons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne est efficace pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps dominant en course interne, mais ne l'est pas pour augmenter celle du quadriceps dominant en course externe ; nous suggérons que le gain de force du quadriceps dominant est spécifique à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne. Au contraire, nous observons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe est efficace pour augmenter la force maximale mesurée du quadriceps dominant en course interne et en course externe ; nous suggérons que le gain de force du quadriceps dominant n'est pas spécifique à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe.

Nous supposons que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course interne entraîne des adaptations nerveuses responsables de la spécificité du gain de force du quadriceps dominant à la position d'entraînement du quadriceps non

dominant (augmentation de l'activation de muscles agonistes, diminution de la co-activation de muscles antagonistes). Par contre, nous n'expliquons pas comment le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe entraîne la non spécificité du gain de force du quadriceps dominant à la position d'entraînement du quadriceps non dominant, car les adaptations nerveuses (augmentation de l'activation de muscles agonistes, diminution de la co-activation de muscles antagonistes) devraient se produire essentiellement à la position d'entraînement, tandis que les adaptations musculaires (augmentation du volume de certaines portions de certains muscles, augmentation de la quantité et de la raideur du tissu conjonctif) ne devraient pas se produire.

4.1.2.5. Conséquences pour la rééducation.

Dans notre étude, le fait d'avoir évalué la force maximale mesurée sur les deux quadriceps, avant et après avoir réalisé les épreuves de fatigue sur un seul quadriceps, nous a permis de mettre en évidence l'efficacité du renforcement isométrique croisé du quadriceps. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux obtenus par Komi et coll. [22], Carolan et Cafarelli [23] ainsi que Weir et coll. [5], mais ne sont pas en accord ceux obtenus par Weir et coll. [6].

Nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps controlatéral soit utilisé chaque fois qu'une pathologie et/ou qu'un traitement nous empêche d'utiliser celui du quadriceps homolatéral. Ce peut être le cas, par exemple, en traumatologie dans le cadre d'une fracture d'un plateau tibial entraînant l'immobilisation d'un genou, en rhumatologie dans le cadre d'une gonarthrose entraînant l'inflammation d'un genou, en neurologie dans le cadre d'un accident vasculaire cérébral entraînant la paralysie d'un hémicorps.

4.2. Volume musculaire.

Le périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CE augmente significativement à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de la base de la patella, mais n'augmente pas significativement plus que celui de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI et

CO, respectivement à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de la base de la patella, qui n'augmente pas. Le périmètre de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO n'augmente pas à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de la base de la patella.

Nous supposons qu'une augmentation, relative mais significative, du périmètre de la cuisse est le signe d'une augmentation du volume du quadriceps non dominant du groupe CE; cela signifierait que le travail statique intermittent du quadriceps non dominant en course externe entraîne des adaptations musculaires, alors que celui du quadriceps non dominant en course interne n'en entraîne pas, avec seulement huit épreuves de fatigue réparties sur quatre semaines. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux obtenus par Noorkõiv et coll. [9] qui observent que le renforcement isométrique du quadriceps en course externe entraîne des adaptations musculaires, alors que celui du quadriceps en course interne n'en entraîne pas, avec dix-huit entraînements répartis sur six semaines; par contre, ils ne sont pas en accord avec ceux obtenus par Kubo et coll. [8] qui observent que le renforcement isométrique entraîne des adaptations musculaires, que ce soit avec le quadriceps en course externe ou interne, mais avec quarante-huit entraînements répartis sur douze semaines.

Parce que la force du quadriceps et la contrainte mécanique qui lui est imposée sont plus importantes lors de sa contraction isométrique maximale en course externe que lors de sa contraction isométrique maximale en course interne [8-9], nous suggérons que huit épreuves de fatigue, réalisées avec le quadriceps en course externe et menées jusqu'à épuisement, sont suffisantes pour induire, en plus des adaptations nerveuses, des adaptations musculaires responsables de la non spécificité du gain de force du quadriceps à sa position d'entraînement.

4.3. Pénibilité des épreuves de fatigue.

Même si la différence entre la pénibilité ressentie par les groupe CI et CE lors de chacune des épreuves de fatigue n'est jamais statistiquement significative, nous estimons que cette différence est cliniquement significative. En effet, bien que la pénibilité ressentie lors des épreuves de fatigue varie énormément d'un sujet à l'autre, nous observons que les sujets du groupe CI présentent une moyenne de 5,7 points avec un écart-type de 2,2 points, alors que

les sujets du groupe CE présentent une moyenne de 7,2 points avec un écart-type de 1,7 points. Ainsi, cette différence nous semble suffisante pour suggérer que le travail statique intermittent du quadriceps en course interne est globalement mieux toléré, ressenti moins pénible, que celui du quadriceps en course externe.

4.4. Contraintes articulaires.

4.4.1. Contraintes fémoro-patellaires.

Van Eijden et coll. [15], étudiant la contrainte en compression s'exerçant sur l'articulation fémoro-patellaire lors de la contraction isométrique du quadriceps tous les 15° de 0° à 90° de flexion du genou, observent qu'elle est minimale à 0° et maximale à 75° de flexion du genou.

4.4.2. Contraintes fémoro-tibiales.

4.4.2.1. Contrainte en compression.

Yasuda et Sasaki [14], étudiant la contrainte en compression s'exerçant sur l'articulation fémoro-tibiale lors de la contraction isométrique du quadriceps à 5°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90° de flexion du genou, observent qu'elle est minimale à 5° et maximale à 60° de flexion du genou. Lutz et coll. [24], étudiant la contrainte en compression s'exerçant sur l'articulation fémoro-tibiale lors de la contraction isométrique du quadriceps à 30°, 60° et 90° de flexion du genou, observent qu'elle est minimale à 30° et maximale à 90° de flexion du genou.

4.4.2.2. Contrainte en cisaillement.

Jurist et Otis [25], Yasuda et Sasaki [23], Howe et coll. [26], Howell [27], Beynnon et coll. [28], Beynnon et coll. [29] ainsi que Toutoungi et coll. [30], étudiant la contrainte en cisaillement s'exerçant sur l'articulation fémoro-tibiale lors de la contraction isométrique du quadriceps, observent qu'elle est antérieure ou postérieure en fonction de l'angle de flexion du genou ; les résultats sont présentés dans le tableau 73.

	Contraction isométrique du quadriceps à différents angles de flexion du genou						
Auteurs	Contrainte en cisaillement antérieur	Contrainte en cisaillement nulle	Contrainte en cisaillement postérieur				
Jurist et Otis [25]	30°, 60°		90°				
Yasuda et Sasaki [23]	5°, 15°, 30°	45°	60°, 75°, 90°				
Howe et coll. [26]	30°		90°				
Howell [27]	15°, 30°, 45°, 60°		75°				
Beynnon et coll. [28]	30°		90°				
Beynnon et coll. [29]	15°, 30°		60°, 90°				
Toutoungi et coll. [30]	15°, 30°, 45°, 60°	75°	90°				

Tableau 73 : contrainte en cisaillement exercée sur l'articulation fémoro-tibiale lors de la contraction isométrique du quadriceps à différents angles de flexion du genou.

4.4.3. Conséquences pour la rééducation.

Ces études montrent que la contrainte en compression s'exerçant sur les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale est faible lors de la contraction isométrique du quadriceps en course interne et forte lors de la contraction isométrique du quadriceps en course externe; de même, elles montrent que la contrainte en cisaillement s'exerçant sur l'articulation fémoro-tibiale est antérieure lors de la contraction isométrique du quadriceps en course interne et postérieure lors de la contraction isométrique du quadriceps en course externe. Au regard de ces résultats, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps en course interne soit privilégié lorsque le patient présente une arthrose fémoro-patellaire et/ou fémoro-tibiale, notamment douloureuse, ou lorsque le patient présente une lésion du ligament croisé postérieur, et nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps en course externe soit privilégié lorsque le patient présente une lésion du ligament croisé antérieur.

Toutefois, nous supposons que la contrainte en compression n'est pas tout à fait représentative du stress subit par les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale, car les auteurs ne tiennent pas compte de l'aire des surfaces articulaires en contact. En effet, pour une même contrainte en compression, le stress subit par les surfaces articulaires sera d'autant plus fort que l'aire de ces surfaces en contact est petite et, inversement, d'autant plus faible que l'aire de ces surfaces en contact est grande.

5. CONCLUSION.

L'objectif de notre étude était d'étudier la spécificité du gain de force du quadriceps à l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent afin d'évaluer l'intérêt de réaliser le renforcement isométrique du quadriceps en course externe, alors qu'il est essentiellement proposé en course interne.

Les résultats de notre étude ont montré que le travail statique intermittent du quadriceps en course interne entraîne un gain de force de ce quadriceps spécifique à sa position d'entraînement, tandis que le travail statique intermittent du quadriceps en course externe entraîne un gain de force de ce quadriceps non spécifique à sa position d'entraînement. Ainsi, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé en course externe lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation optimale de la force du quadriceps, c'est-à-dire dans toute l'amplitude du genou, et que le travail statique intermittent du quadriceps soit réalisé à un angle de flexion particulier du genou lorsque l'objectif de la rééducation est de garantir une augmentation spécifique de la force du quadriceps à cet angle de flexion du genou. Néanmoins, nous modérons ces propos en précisant que le thérapeute doit également tenir compte des contraintes en compression et en cisaillement s'exerçant sur les articulations fémoro-patellaire et fémoro-tibiale pour choisir, en fonction de la pathologie affectant le patient, l'angle de flexion du genou utilisé au cours du travail statique intermittent du quadriceps. De même, nous notons que les épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course interne semblent avoir été mieux tolérées, ressenties moins pénibles, que celles réalisées avec le quadriceps en course externe.

Parce que nous avons observé que le périmètre de la cuisse du quadriceps entraîné en course externe augmente, alors que celui de la cuisse du quadriceps entraîné en course interne n'augmente pas, nous supposons que huit épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course interne induisent uniquement des adaptations nerveuses responsables de la spécificité du gain de force de ce quadriceps à sa position d'entraînement, alors que huit épreuves de fatigue réalisées avec le quadriceps en course externe induisent, en plus des adaptations nerveuses, des adaptations musculaires responsables de la non spécificité du gain de force de ce quadriceps à sa position d'entraînement. Toutefois, pour mieux connaître et comprendre les mécanismes influençant la spécificité du gain de force musculaire à l'angle articulaire d'entraînement, nous pensons que l'étude devrait être à nouveau réalisée avec, non seulement une mesure individuelle du volume du vaste médial, du vaste latéral, du vaste intermédiaire et du droit fémoral par imagerie, mais aussi une mesure de leur activité électrique ainsi que de celle du semi-tendineux, du semi-membraneux et du biceps fémoral par électromyogramme.

Les résultats de notre étude ont également montré l'efficacité du renforcement musculaire isométrique croisé. Ainsi, nous suggérons que le travail statique intermittent du quadriceps controlatéral soit utilisé chaque fois qu'une pathologie et/ou qu'un traitement nous empêche d'utiliser celui du quadriceps homolatéral.

BIBLIOGRAPHIE.

- 1- BANDY W.D., HANTEN W.P. Changes in torque and electromyographic activity of the quadriceps femoris muscles following isometric training. Journal of the American Physical Therapy Association; 1993; 73 (7); 455-465.
- 2- MARKS R. The effect of isometric quadriceps strength training in mid-range for osteoarthritis of the knee. Arthritis Care and Research; 1993; 6 (1); 52-56.
- 3- MARKS R. The effects of 16 months of angle-specific isometric strengthening exercises in mid-range on torque of the knee extensor muscles in osteoarthritis of the knee: a case study. Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy; 1994; 20 (2); 103-109.
- 4- LINDH M. Increase of muscle strength from isometric quadriceps exercises at different knee angles. Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine; 1979; 11 (1); 33-36.
- 5- WEIR J.P., HOUSH T.J., WEIR L.L. Electromyographic evaluation of joint angle specificity and cross-training after isometric training. Journal of Applied Physiology; 1994; 77 (1); 197-201.
- 6- WEIR J.P., HOUSH T.J., WEIR L.L., JOHNSON G.O. Effects of unilateral isometric strength training on joint angle specificity and cross-training. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology; 1995; 70 (4); 337-343.
- 7- ZACIORSKIJ V.M., RAIZIN L.M. Die Ubertragung des kumulativen Trainingseffektes bei Kraftübungen. Leistungssport; 1975; 5 (1); 17-24.
- 8- KUBO K., OHGO K., TAKEISHI R., YOSHINAGA K., TSUNODA N., KANEHISA H., FUKUNAGA T. Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon complex in vivo. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports; 2006; 16 (3); 159-167.
- 9- NOORKOIV M., NOSAKA K., BLAZEVICH A.J. Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle specific force change. Medicine and Science in Sports and exercise; 2014; 46 (8); 1525-1537.
- 10-MARIEB E., HOEHN K. Muscles et tissu musculaire. Anatomie et physiologie humaines ; 8^{ème} édition ; Londres ; Pearson ; 2010 ; 315-435.

- 11-LARRY KENNEY W., WILMORE J.H., COSTILL D.L. Structure et fonctionnement musculaire. Physiologie du sport et de l'exercice; 5^{ème} édition; Bruxelles; De Boeck; 2013; 25-45.
- 12-DUFOUR M. Myologie. Anatomie de l'appareil locomoteur : tome 1, membres inférieurs ; 2ème édition ; Paris ; Masson ; 2007 ; 181-363.
- 13-DUFOUR M., PILLU M. Bases fondamentales. Biomécanique fonctionnelle : membres, tête, tronc ; 1 ère édition ; Paris ; Masson ; 2006 ; 3-113.
- 14-YASUDA K., SASAKI T. Exercise after anterior cruciate ligament reconstruction. The force exerted on the tibia by the separate isometric contractions of the quadriceps or the hamstrings. Clinical Orthopaedics and Related Research; 1987; 220; 275-283.
- 15-VAN EIJDEN T.M.G.J., WEIJS W.A., KOUWENHOVEN E., VERBURG J. Forces acting on the patella during maximal voluntary contraction of the quadriceps femoris muscle at different knee flexion/extension angles. Acta Anatomica; 1987; 129 (4); 310-314.
- 16-NORDIN M., FRANKEL V.H. Biomechanics of skeletal muscle. Basic biomechanics of the musculoskeletal system; 4^{ème} édition; Baltimore; Lippincott Williams and Wilkins; 2012; 148-175.
- 17-COMETTI G. Les mécanismes de la force. Les méthodes modernes de musculation : tome 1, données théoriques ; 1^{ère} édition ; Dijon ; Presses de l'Université de Bourgogne ; 1989 ; 29-169.
- 18-WEINECK J. Entraı̂nement de la force. Manuel d'entraı̂nement ; $4^{\grave{e}me}$ édition ; Paris ; Vigot ; 1997 ; 177-291.
- 19-CHAUVIN C. Le renforcement musculaire par le travail statique intermittent. Annales de Kinésithérapie ; 1980 ; 7 (7) ; 297-302.
- 20-TROISIER O. Le travail statique intermittent en rééducation. HEULEU J.N., SIMON L. Muscle et rééducation; 1ère édition; Paris; Masson; 1988; 166-174. Problèmes en médecine de rééducation; 12.
- 21-PEYRANNE J. Les techniques de renforcement musculaire. Annales de Kinésithérapie; 1989; 16 (6); 293-298.
- 22-KOMI P.V., VIITASALO J.T., RAURAMAA R., VIHKO V. Effect of isometric strength training of mechanical, electrical, and metabolic aspects of muscle function.

- European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology; 1978; 40 (1); 45-55.
- 23-CAROLAN B., CAFARELLI E. Adaptations in coactivation after isometric resistance training. Journal of Applied Physiology; 1992; 73 (3); 911-917.
- 24-LUTZ G.E., PALMITIER R.A., AN K.N., CHAO E.Y. Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. Journal of Bone and Joint Surgery; 1993; 75 (5); 732-739.
- 25-JURIST K.A., OTIS J.C. Anteroposterior tibiofemoral displacements during isometric extension efforts. The roles of external load and knee flexion angle. American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation; 1985; 13 (4); 254-258.
- 26-HOWE J.G., WERTHEIMER C., JOHNSON R.J., NICHOLS C.E., POPE M.H., BEYNNON B. Arthroscopic strain gauge measurement of the normal anterior cruciate ligament. Arthroscopy; 1990; 6 (3); 198-204.
- 27- HOWELL S.M. Anterior tibial translation during a maximum quadriceps contraction: is it clinically significant? American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation; 1990; 18 (6); 573-578.
- 28-BEYNNON B., HOWE J.G., POPE M.H., JOHNSON R.J., FLEMINGB B.C. The measurement of anterior cruciate ligament strain in vivo. International Orthopaedics; 1992; 16(1); 1-12.
- 29-BEYNNON B.D., FLEMING B.C., JOHNSON R.J., NICHOLS C.E., RENSTROM P.A., POPE M.H. Anterior cruciate ligament strain behaviour during rehabilitation exercises in vivo. American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation; 1995; 23 (1); 24-34.
- 30-TOUTOUNGI D.E., LU T.W., LEARDINI A., CATANI F., O'CONNOR J.J. Cruciate ligament forces in the human knee during rehabilitation exercises. Clinical Biomechanics; 2000; 15 (3); 176-187.

ANNEXE 1: abréviations.

- coll.. : coll.aborateur(s).
- TSI: travail statique intermittent.
- FMM : force maximale mesurée.
- FMT : force maximale théorique.
- EF: épreuve de fatigue.
- CI: course interne.
- CE: course externe.
- CO: contrôle.
- i : initiale.
- f: finale.
- °: degré(s).
- sec : seconde(s).
- min: minute(s).
- kg : kilogramme(s).
- cm : centimètre(s).
- %: pourcent(s).
- Δ : évolution.
- * : différence significative.

ANNEXE 2 : caractéristiques des sujets.

Sujet	Sexe	Age	Groupe	Latéralité
1	femme	22 ans	CI	droite
2	femme	21 ans	CI	droite
3	femme	20 ans	CI	droite
4	femme	22 ans	CI	droite
5	femme	22 ans	CI	gauche
6	femme	21 ans	CI	gauche
7	femme	21 ans	CI	droite
8	femme	22 ans	CI	gauche
9	homme	21 ans	CI	droite
10	femme	21 ans	CE	gauche
11	femme	20 ans	CE	gauche
12	femme	19 ans	CE	droite
13	femme	19 ans	CE	droite
14	femme	20 ans	CE	droite
15	femme	30 ans	CE	droite
16	femme	22 ans	CE	droite
17	femme	20 ans	CE	droite
18	homme	20 ans	CE	droite
19	femme	21 ans	CO	droite
20	femme	19 ans	CO	droite
21	femme	19 ans	CO	droite
22	femme	19 ans	CO	droite
23	homme	21 ans	CO	gauche
24	homme	20 ans	CO	gauche
25	homme	20 ans	CO	droite

Tableau 1 : caractéristiques des sujets des groupes CI, CE et CO.

ANNEXE 3: abaque.

Nombre de répétitions	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pourcentage de la FMT	100	96	93	90	87	84	82	80	78	77	75
Nombre de répétitions		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pourcentage de la FMT		74	73	71	70	69	68	67	66	66	65
Nombre de répétitions		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Pourcentage de la FMT		64	64	63	62	62	61	60	60	59	59
Nombre de répétitions		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Pourcentage de la FMT		58	58	58	57	57	57	56	56	56	56
Nombre de répétitions	1	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Pourcentage de la FMT		55	55	55	55	54	54	54	54	53	53
Nombre de répétitions		51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Pourcentage de la FMT		53	53	52	52	52	52	51	51	51	51

ANNEXE 4: calendrier.

Semaine 1:

- groupe CI (lundi 10 et jeudi 13 novembre 2014):
 - o séance 1 : détermination de la FMMi-CI ;
 - o séance 2 : détermination de la FMMi-CE ;
- groupe CE (mardi 11 et vendredi 14 novembre 2014):
 - o séance 1 : détermination de la FMMi-CI;
 - o séance 2 : détermination de la FMMi-CE ;
- groupe CO (lundi 16 et jeudi 19 mars 2015) :
 - o séance 1 : détermination de la FMMi-CI :
 - o séance 2 : détermination de la FMMi-CE.

Semaine 2:

- groupe CI (lundi 17 et jeudi 20 novembre 2014):
 - o séance 3 : EF1 à 65 % de la FMMi-CI, détermination de la FMT1-CI ;
 - o séance 4 : EF2 à 65 % de la FMT1-CI, détermination de la FMT2-CI ;
- groupe CE (mardi 18 et vendredi 21 novembre 2014):
 - o séance 3 : EF1 à 65 % de la FMMi-CE, détermination de la FMT1-CE ;
 - o séance 4 : EF2 à 65 % de la FMT1-CE, détermination de la FMT2-CE.

Semaine 3:

- groupe CI (lundi 24 et jeudi 27 novembre 2014):
 - o séance 5 : EF3 à 65 % de la FMT2-CI, détermination de la FMT3-CI ;
 - o séance 6 : EF4 à 65 % de la FMT3-CI, détermination de la FMT4-CI ;
- groupe CE (mardi 25 et vendredi 28 novembre 2014):
 - o séance 5 : EF3 à 65 % de la FMT2-CE, détermination de la FMT3-CE ;
 - o séance 6 : EF4 à 65 % de la FMT3-CE, détermination de la FMT4-CE.

Semaine 4:

groupe CI (lundi 1 et jeudi 4 décembre 2014) :

- o séance 7 : EF5 à 65 % de la FMT4-CI, détermination de la FMT5-CI ;
- o séance 8 : EF6 à 65 % de la FMT5-CI, détermination de la FMT6-CI ;
- groupe CE (mardi 2 et vendredi 5 décembre 2014) :
 - o séance 7 : EF5 à 65 % de la FMT4-CE, détermination de la FMT5-CE ;
 - o séance 8 : EF6 à 65 % de la FMT5-CE, détermination de la FMT6-CE.

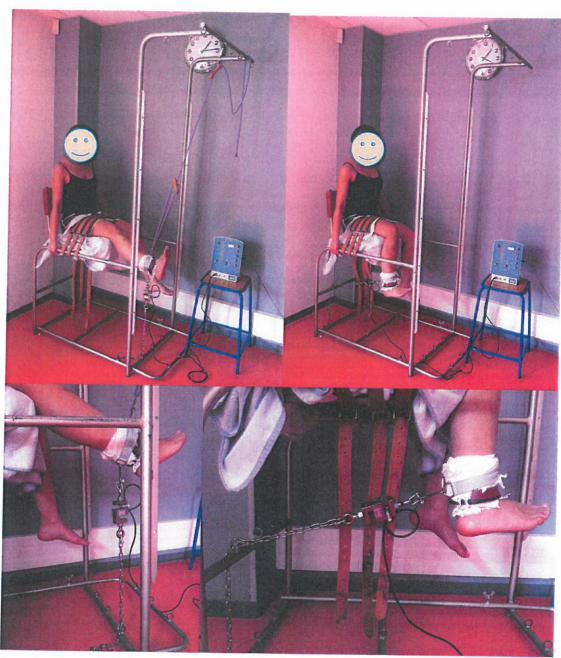
Semaine 5:

- groupe CI (lundi 8 et jeudi 11 décembre 2014) :
 - o séance 9 : EF7 à 65 % de la FMT6-CI, détermination de la FMT7-CI ;
 - o séance 10 : EF8 à 65 % de la FMT7-CI, détermination de la FMT8-CI ;
- groupe CE (mardi 9 et vendredi 12 décembre 2014) :
 - o séance 9 : EF7 à 65 % de la FMT6-CE, détermination de la FMT7-CE ;
 - o séance 10 : EF8 à 65 % de la FMT7-CE, détermination de la FMT8-CE.

Semaine 6:

- groupe CI (lundi 15 et jeudi 18 décembre 2014) :
 - o séance 11 : détermination de la FMMf-CI ;
 - o séance 12 : détermination de la FMMf-CE ;
- groupe CE (mardi 16 et vendredi 19 décembre 2014) :
 - o séance 11 : détermination de la FMMf-CI ;
 - o séance 12 : détermination de la FMMf-CE ;
- groupe CO (lundi 20 et jeudi 23 avril 2015) :
 - o séance 3 : détermination de la FMMf-CI ;
 - o séance 4 : détermination de la FMMf-CE.

ANNEXE 5: matériel et installation.



Photos de gauche : matériel et installation du quadriceps en course interne. Photos de droite : matériel et installation du quadriceps en course externe.

ANNEXE 6: force musculaire.

	Groupe CI - Quadrio	eps non dominant	
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg
1	32,0	56,0	24,0
2	30,0	46,0	16,0
3	34,0	46,0	12,0
4	40,0	60,0	20,0
5	34,0	46,0	12,0
6	34,0	48,0	14,0
7	14,0	28,0	14,0
8	50,0	60,0	10,0
9	30,0	46,0	16,0
Moyenne	33,1	48,4	15,3
Ecart-type	9,5	9,8	4,4
Significativité		p = 0,009	

Tableau 3 : évolution de la FMM-CI du quadriceps non dominant du groupe CI.

	Groupe CI - Quadriceps non dominant					
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en kg			
1	28,0	32,0	4,0			
2	36,0	32,0	-4,0			
3	30,0	44,0	14,0			
4	32,0	32,0	0,0			
5	32,0	32,0	0,0			
6	28,0	30,0	2,0			
7	20,0	22,0	2,0			
8	44,0	50,0	6,0			
9	44,0	54,0	10,0			
Moyenne	32,7	36,4	3,8			
Ecart-type	7,7	10,5	5,5			
Significativité		p = 0.090				

Tableau 4 : évolution de la FMM-CE du quadriceps non dominant du groupe CI.

	Groupe CI - Qua	driceps dominant	
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg
1	34,0	46,0	12,0
2	38,0	40,0	2,0
3	38,0	46,0	8,0
4	44,0	60,0	16,0
5	36,0	48,0	12,0
6	34,0	40,0	6,0
7	14,0	22,0	8,0
8	50,0	62,0	12,0
9	38,0	44,0	6,0
Moyenne	36,2	45,3	9,1
Ecart-type	9,8	11,7	4,3
Significativité		p = 0.009	

Tableau 5 : évolution de la FMM-CI du quadriceps dominant du groupe CI.

	Groupe CI - Quadriceps dominant					
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en kg			
1	28,0	30,0	2,0			
2	36,0	30,0	-6,0			
3	36,0	44,0	8,0			
4	32,0	34,0	2,0			
5	38,0	36,0	-2,0			
6	28,0	28,0	0,0			
7	22,0	18,0	-4,0			
8	44,0	44,0	0,0			
9	54,0	58,0	4,0			
Moyenne	35,3	35,8	0,4			
Ecart-type	9,5	11,6	4,2			
Significativité		p = 0.865				

Tableau 6 : évolution de la FMM-CE du quadriceps dominant du groupe CI.

	Groupe CE - Quadi	riceps non dominant	
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg
10	44,0	56,0	12,0
11	30,0	36,0	6,0
12	28,0	36,0	8,0
13	26,0	38,0	12,0
14	28,0	46,0	18,0
15	28,0	30,0	2,0
16	40,0	44,0	4,0
17	36,0	52,0	16,0
18	40,0	60,0	20,0
Moyenne	33,3	44,2	10,9
Ecart-type	6,7	10,2	6,3
Significativité		p = 0.009	

Tableau 7 : évolution de la FMM-CI du quadriceps non dominant du groupe CE.

	Groupe CE - Quadi	riceps non dominant	
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en kg
10	38,0	46,0	8,0
11	18,0	36,0	18,0
12	28,0	34,0	6,0
13	28,0	42,0	14,0
14	30,0	38,0	8,0
15	30,0	36,0	6,0
16	30,0	46,0	16,0
17	34,0	54,0	20,0
18	42,0	66,0	24,0
Moyenne	30,9	44,2	13,3
Ecart-type	6,8	10,4	6,6
Significativité		p = 0.009	

Tableau 8 : évolution de la FMM-CE du quadriceps non dominant du groupe CE.

	Groupe CE - Quad	riceps dominant	
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg
10	46,0	56,0	10,0
11	28,0	36,0	8,0
12	30,0	44,0	14,0
13	28,0	40,0	12,0
14	28,0	46,0	18,0
15	28,0	28,0	0,0
16	36,0	46,0	10,0
17	44,0	50,0	6,0
18	48,0	60,0	12,0
Moyenne	35,1	45,1	10,0
Ecart-type	8,6	9,8	5,1
Significativité		p = 0,014	

Tableau 9 : évolution de la FMM-CI du quadriceps dominant du groupe CE.

	Groupe CE - Quadriceps dominant				
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en		
10	38,0	44,0	6,0		
11	22,0	32,0	10,0		
12	28,0	38,0	10,0		
13	30,0	36,0	6,0		
14	30,0	36,0	6,0		
15	30,0	42,0	12,0		
16	34,0	42,0	8,0		
17	36,0	48,0	12,0		
18	46,0	60,0	14,0		
Moyenne	32,7	42,0	9,3		
Ecart-type	6,9	8,3	3,0		
Significativité		p = 0.009			

Tableau 10 : évolution de la FMM-CE du quadriceps dominant du groupe CE.

	Groupe CO - Quadriceps non dominant				
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg		
19	32,0	32,0	0,0		
20	44,0	44,0	0,0		
21	32,0	36,0	4,0		
22	28,0	26,0	-2,0		
23	44,0	46,0	2,0		
24	56,0	58,0	2,0		
25	46,0	52,0	6,0		
Moyenne	40,3	42,0	1,7		
Ecart-type	10,0	11,3	2,7		
Significativité		p = 0,170			

Tableau 11 : évolution de la FMM-CI du quadriceps non dominant du groupe CO.

	Groupe CO - Quad	riceps non dominant	
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en kg
19	28,0	30,0	2,0
20	28,0	28,0	0,0
21	28,0	30,0	2,0
22	24,0	20,0	-4,0
23	46,0	48,0	2,0
24	48,0	44,0	-4,0
25	46,0	46,0	0,0
Moyenne	35,4	35,1	-0,3
Ecart-type	10,6	10,8	2,7
Significativité		p = 0.783	

Tableau 12 : évolution de la FMM-CE du quadriceps non dominant du groupe CO.

	Groupe CO - Quad		
Sujet	FMMi-CI en kg	FMMf-CI en kg	Δ FMM-CI en kg
19	34,0	34,0	0,0
20	46,0	48,0	2,0
21	36,0	36,0	0,0
22	30,0	30,0	0,0
23	46,0	48,0	2,0
24	58,0	58,0	0,0
25	52,0	52,0	0,0
Moyenne	43,1	43,7	0,6
Ecart-type	10,2	10,4	1,0
Significativité		p = 0.346	

Tableau 13 : évolution de la FMM-CI du quadriceps dominant du groupe CO.

	Groupe CO - Qua	driceps dominant	
Sujet	FMMi-CE en kg	FMMf-CE en kg	Δ FMM-CE en kg
19	36,0	34,0	-2,0
20	34,0	36,0	2,0
21	30,0	30,0	0,0
22	26,0	24,0	-2,0
23	52,0	52,0	0,0
24	56,0	58,0	2,0
25	44,0	44,0	0,0
Moyenne	39,7	39,7	0,0
Ecart-type	11,3	12,2	1,6
Significativité		p = 1,000	

Tableau 14 : évolution de la FMM-CE du quadriceps dominant du groupe CO.

	FMMi-CI - Quadr	iceps non dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,722	p = 0.337
Groupe CE	p = 0,722		p = 0.097
Groupe CO	p = 0.337	p = 0.097	F 0,057

Tableau 15 : comparaison de la FMMi-CI du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

FMMi-CE - Quadriceps non dominant				
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0.623	p = 0.829	
Groupe CE	p = 0,623		p = 0.829	
Groupe CO	p = 0.829	p = 0.829	P 0,02)	

Tableau 16 : comparaison de la FMMi-CE du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

	FMMi-CI - Qua	driceps dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,476	p = 0.365
Groupe CE	p = 0.476		p = 0.087
Groupe CO	p = 0.365	p = 0.087	P 0,007

Tableau 17 : comparaison de la FMMi-CI du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

	FMMi-CE - Qua	driceps dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.657	p = 0.559
Groupe CE	p = 0.657		p = 0.262
Groupe CO	p = 0.559	p = 0.262	P 0,202

Tableau 18 : comparaison de la FMMi-CE du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

FMMf-CI - Quadriceps non dominant				
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0.303	p = 0.197	
Groupe CE	p = 0.303		p = 0.710	
Groupe CO	p = 0.197	p = 0.710	P 0,710	

Tableau 19 : comparaison de la FMMf-CI du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

	FMMI-CE - Quadr	iceps non dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.068	p = 0.487
Groupe CE	p = 0.068		p = 0.167
Groupe CO	p = 0.487	p = 0.167	P 0,107

Tableau 20 : comparaison de la FMMf-CE du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

FMMf-CI - Quadriceps dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,476	p = 0.365
Groupe CE	p = 0,476		p = 0.054
Groupe CO	p = 0.365	p = 0.054	P 0,021

Tableau 21 : comparaison de la FMMf-CI du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

FMMf-CE - Quadriceps dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,156	p = 0.557
Groupe CE	p = 0.156	Contract Constitution and Security Secu	p = 0.559
Groupe CO	p = 0.557	p = 0.559	F 0,000

Tableau 22 : comparaison de la FMMf-CE du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

	∆ FMM-CI - Quadi	riceps non dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.168	p = 0.001
Groupe CE	p = 0.168		p = 0.006
Groupe CO	p = 0,001	p = 0.006	

Tableau 23 : comparaison de l'évolution de la FMM-CI du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

	A FMM-CE - Quad	riceps non dominant	f
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.007	p = 0.128
Groupe CE	p = 0.007		p = 0.001
Groupe CO	p = 0.128	p = 0.001	- 3,002

Tableau 24 : comparaison de l'évolution de la FMM-CE du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO.

	Δ FMM-CI - Qua	driceps dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.654	p = 0.001
Groupe CE	p = 0,654		p = 0.004
Groupe CO	p = 0.001	p = 0,004	

Tableau 25 : comparaison de l'évolution de la FMM-CI du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

	Δ FMM-CE - Qua	adriceps dominant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.001	p = 0.828
Groupe CE	p = 0.001		p = 0.001
Groupe CO	p = 0.828	p = 0.001	and the state of t

Tableau 26 : comparaison de l'évolution de la FMM-CE du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO.

		Grou	ipe CI - Poid	ls en kg / Nor	nbre de répé	titions	95.	(1) E- (1)
Sujet	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
1	20,0 / 38,0	24,0 / 36,0	28,0 / 18,0	28,0 / 24,0	30,0 / 20,0	30,0 / 20,0	30,0 / 21,0	30,0 / 23,0
2	20,0 / 18,0	20,0 / 27,0	22,0 / 27,0	24,0 / 28,0	26,0 / 18,0	26,0 / 20,0	26,0 / 21,0	26,0 / 24,0
3	22,0 / 33,0	24,0 / 26,0	26,0 / 28,0	28,0 / 30,0	30,0 / 26,0	32,0 / 26,0	34,0 / 17,0	34,0 / 18,0
4	26,0 / 27,0	28,0 / 30,0	30,0 / 28,0	32,0 / 26,0	34,0 / 26,0	36,0 / 17,0	36,0 / 29,0	40,0 / 20,0
5	22,0 / 33,0	24,0 / 26,0	26,0 / 29,0	28,0 / 17,0	28,0 / 18,0	28,0 / 17,0	28,0 / 28,0	30,0 / 16,0
6	22,0 / 29,0	24,0 / 25,0	26,0 / 29,0	28,0 / 26,0	30,0 / 21,0	30,0 / 17,0	30,0 / 17,0	30,0 / 14,0
7	10,0 / 14,0	10,0 / 46,0	12,0 / 60,0	16,0 / 60,0	20,0 / 17,0	20,0 / 18,0	20,0 / 21,0	20,0 / 21,0
8	32,0 / 36,0	36,0 / 18,0	36,0 / 26,0	38,0 / 22,0	38,0 / 17,0	38,0 / 27,0	40,0 / 18,0	40,0 / 40,0
9	20,0 / 20,0	20,0 / 26,0	22,0 / 28,0	24,0 / 26,0	26,0 / 21,0	26,0 / 24,0	28,0 / 23,0	28,0 / 17,0
oyenne	21,6 / 27,6	23,3 / 28,9	25,3 / 30,3	27,3 / 28,8	29,1 / 20,4	29,6 / 20,7	30,2 / 21,7	30,9 / 21,4
art-type	5,8 / 8,5	6,9 / 8,0	6,6 / 11,6	6,0 / 12,3	5,1 / 3,5	5,5 / 4,0	5,9 / 4,4	6,4 / 7,7

Tableau 27 : poids utilisé et nombre de répétitions réalisées par le groupe CI lors des EF.

		Grou	ipe CE - Poid	ls en kg / Noi	nbre de répé	titions		
Sujet	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
10	24,0 / 26,0	26,0 / 18,0	26,0 / 23,0	26,0 / 24,0	28,0 / 21,0	28,0 / 17,0	28,0 / 26,0	30,0 / 23,0
11	12,0 / 23,0	12,0 / 60,0	16,0 / 21,0	16,0 / 17,0	16,0 / 18,0	16,0 / 27,0	18,0 / 21,0	18,0 / 20,0
12	18,0 / 15,0	16,0 / 31,0	18,0 / 17,0	18,0 / 21,0	18,0 / 26,0	20,0 / 26,0	22,0 / 17,0	22,0 / 21,0
13	18,0 / 14,0	16,0 / 36,0	18,0 / 17,0	18,0 / 18,0	18,0 / 26,0	20,0 / 26,0	22,0 / 23,0	22,0 / 23,0
14	20,0 / 28,0	22,0 / 24,0	22,0 / 30,0	24,0 / 26,0	26,0 / 23,0	26,0 / 27,0	28,0 / 22,0	28,0 / 26,0
15	20,0 / 13,0	18,0 / 16,0	16,0 / 23,0	16,0 / 23,0	16,0 / 24,0	16,0 / 32,0	18,0 / 29,0	20,0 / 36,0
16	20,0 / 20,0	20,0 / 23,0	20,0 / 28,0	22,0 / 24,0	22,0 / 27,0	24,0 / 25,0	26,0 / 24,0	28,0 / 17,0
17	22,0 / 17,0	22,0 / 18,0	22,0 / 18,0	22,0 / 21,0	22,0 / 23,0	22,0 / 28,0	24,0 / 23,0	24,0 / 24,0
18	28,0 / 17,0	28,0 / 23,0	28,0 / 24,0	30,0 / 18,0	30,0 / 24,0	32,0 / 17,0	32,0 / 20,0	32,0 / 42,0
Moyenne	20,2 / 19,2	20,0 / 27,7	20,7 / 22,3	21,3 / 21,3	21,8 / 23,6	22,7 / 25,0	24,2 / 22,8	24,9 / 25,8
Ecart-type	4,4 / 5,4	5,1 / 13,7	4,2 / 4,6	4,8 / 3,2	5,2 / 2,8	5,4 / 4,9	4,7 / 3,5	4,8 / 8,1

Tableau 28 : poids utilisé et nombre de répétitions réalisées par le groupe CE lors des EF.

					Groupe Cl					
Sujet	FMMi en kg	FMT1 en kg	FMT2 en kg	FMT3 en kg	FMT4	FMT5	FMT6	FMT7	FMT8	FMM
li .	32,0	36,0	42,0	42,0	en kg 45,0	en kg 46,0	en kg 46,0	en kg 47,0	en kg 48,0	en kg 56,0
2	30,0	30,0	33,0	37,0	40,0	39,0	40,0	41,0	42,0	46,0
3	34,0	38,0	39,0	43,0	47,0	49,0	52,0	51,0	52,0	46,0
4	40,0	43,0	47,0	50,0	52,0	56,0	54,0	61,0	62,0	60,0
5	34,0	38,0	39,0	44,0	42,0	42,0	42,0	47,0	44,0	46,0
6	34,0	37,0	39,0	44,0	46,0	47,0	45,0	45,0	43,0	48,0
7	14,0	14,0	19,0	24,0	31,0	30,0	30,0	31,0	31,0	28,0
8	50,0	56,0	54,0	59,0	59,0	57,0	63,0	61,0	71,0	60,0
9	30,0	31,0	33,0	37,0	39,0	41,0	42,0	44,0	42,0	46,0

Tableau 29 : évolution de la FMM et de la FMT du groupe CI.

					Groupe Cl	:				
Sujet	FMMi en kg	FMT1 en kg	FMT2 en kg	FMT3 en kg	FMT4 en kg	FMT5 en kg	FMT6 en kg	FMT7 en kg	FMT8 en kg	FMM en kg
10	38,0	39,0	39,0	41,0	42,0	44,0	42,0	46,0	48,0	46,0
11	18,0	19,0	24,0	25,0	24,0	24,0	27,0	28,0	28,0	36,0
12	28,0	26,0	27,0	27,0	28,0	30,0	33,0	33,0	34,0	34,0
13	28,0	26,0	28,0	27,0	27,0	30,0	33,0	35,0	35,0	42,0
14	30,0	33,0	35,0	37,0	39,0	41,0	43,0	44,0	46,0	38,0
15	30,0	28,0	26,0	25,0	25,0	26,0	28,0	31,0	35,0	36,0
16	30,0	31,0	32,0	33,0	35,0	37,0	39,0	42,0	42,0	46,0
17	34,0	33,0	33,0	33,0	34,0	35,0	37,0	38,0	39,0	54,0
8	42,0	42,0	44,0	45,0	45,0	48,0	48,0	49,0	58,0	66,0

Tableau 30 : évolution de la FMM et de la FMT du groupe CE.

				Groupe	e ČI				
Significativité	FMT1	FMT2	FMT3	FMT4	FMT5	FMT6	FMT7	FMT8	FMMf
FMMi	p = 0,021								
FMT1		p = 0.032							
FMT2			p = 0.013						
FMT3				p = 0.033					
FMT4					p = 0.354				
FMT5						p = 0,527			
FMT6							p = 0.177		
FMT7								p = 1,000	
FMT8									p = 0.859

Tableau 31 : évolution de la FMM et de la FMT du groupe CI.

			74	Group	e CE				
Significativité	FMT1	FMT2	FMT3	FMT4	FMT5	FMT6	EMT7	FMT8	FMMf
FMMi	p = 0,776								3 4.7
FMT1		p = 0,121							
FMT2			p = 0,187						
FMT3				p = 0,105					
FMT4				LEEVENAGE **	p = 0,013				
FMT5						p = 0.036			
FMT6							p = 0.013		
FMT7								p = 0,035	
FMT8									p = 0,181

Tableau 32 : évolution de la FMM et de la FMT du groupe CE.

	Groupe CI	Groupe CE	Significativité
FMMi en kg	$33,1 \pm 9,5$	$30,9 \pm 6,8$	p = 0.346
FMT1 en kg	$35,9 \pm 11,2$	$30,8 \pm 7,0$	p = 0.232
FMT2 en kg	$38,3 \pm 9,8$	$32,0 \pm 6,6$	p = 0,100
FMT3 en kg	$42,2 \pm 9,6$	$32,6 \pm 7,3$	p = 0.051
FMT4 en kg	$44,6 \pm 8,0$	$33,2 \pm 7,7$	p = 0.012
FMT5 en kg	$45,2 \pm 8,5$	$35,0 \pm 8,2$	p = 0.030
FMT6 en kg	$46,0 \pm 9,4$	$36,7 \pm 7,1$	p = 0.042
FMT7 en kg	$47,6 \pm 9,4$	$38,4 \pm 7,2$	p = 0.052
FMT8 en kg	$48,3 \pm 11,9$	$40,6 \pm 9,1$	p = 0.144
FMMf en kg	$48,4 \pm 9,8$	44.2 ± 10.4	p = 0,207

Tableau 33 : comparaison de l'évolution de la FMM et de la FMT des groupes CI et CE.

Annexe 7: volume musculaire.

	G	Froupe CI -	Quadriceps no	n dominant			
Sujet		nètre en cm		Périmètre en cm à 10 cm			
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution	
1	37,0	37,0	0,0	40,0	39,5	-0,5	
2	38,0	37,5	-0,5	42,0	42,0	0,0	
3	38,0	38,5	0,5	42,0	42,0	0,0	
4	45,5	45,5	0,0	49,5	49,0	-0,5	
5	41,5	41,0	-0,5	46,5	45,5	-1,0	
6	40,0	41,0	1,0	44,0	45,5	1,5	
7	40,0	40,5	0,5	42,5	42,5	0,0	
8	43,5	43,5	0,0	48,5	48,5	0,0	
9	46,0	47,5	1,5	51,0	53,0	2,0	
Moyenne	41,1	41,3	0,3	45,1	45,3	0,2	
Ecart-type	3,3	3,6	0,7	3,9	4,3	1,0	
Significativité		p = 0.281		-,-	p = 0.786	1,0	

Tableau 34 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CI à 5 cm et 10 cm.

Sujet	Périm	ètre en cm	15 cm	Périm	Périmètre en cm à 20 cm			
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution		
1	45,5	45,0	-0,5	49,5	49,5	0,0		
2	46,0	46,0	0,0	50,0	50,0	0,0		
3	46,5	47,0	0,5	51,5	51,5	0,0		
4	53,0	52,5	-0,5	57,5	57,5	0,0		
5	51,0	50,5	-0,5	56,5	55,5	-1,0		
6	49,0	50,5	1,5	53,5	55,0	1,5		
7	45,0	45,0	0,0	48,5	48,5	0,0		
8	53,0	52,5	-0,5	58,5	57,5	-1,0		
9	57,0	58,5	1,5	60,0	61,5	1,5		
Moyenne	49,6	49,7	0,2	53,9	54,1	0,1		
Ecart-type	4,2	4,5	0,8	4,3	4,4	0,9		
ignificativité		p = 0,792			p = 0.577	0,2		

Tableau 35 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CI à 15 cm et 20 cm.

		the College of the Control of the College Annual Association (see Association about	- Quadriceps	dominant				
Sujet	Périn	nètre en cm	à 5 cm	Périm	Périmètre en cm à 10 cm			
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution		
1	36,5	36,5	0,0	40,0	40,0	0,0		
2	39,0	38,5	-0,5	42,5	42,0	-0,5		
3	40,0	39,5	-0,5	43,0	42,0	-1,0		
4	46,0	46,0	0,0	50,5	50,5	0,0		
5	42,0	42,5	0,5	46,5	46,5	0,0		
6	37,0	38,5	1,5	42,5	43,5	1,0		
7	39,5	40,0	0,5	42,5	43,0	0,5		
8	44,5	45,0	0,5	48,5	49,5	1,0		
9	46,5	48,0	1,5	52,0	53,0	1,0		
Moyenne	41,2	41,6	0,4	45,3	45,6	0,2		
Ecart-type	3,7	4,0	0,7	4,2	4,5	0,7		
Significativité		p = 0.187			p = 0.387	3,7		

Tableau 36 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant du groupe CI à 5 cm et 10 cm.

	Dánim	AND DESCRIPTION OF THE PARTY OF	- Quadriceps			
Sujet	Périmètre en cm à 15 cm			Périmètre en cm à 20 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
1	45,0	45,5	0,5	50,0	50,0	0,0
2	47,0	46,5	-0,5	50,0	49,5	-0,5
3	47,5	47,0	-0,5	52,5	52,0	-0,5
4	54,5	54,0	-0,5	59,5	58,5	-1,0
5	52,0	51,5	-0,5	56,5	55,5	-1,0
6	48,0	49,5	1,5	52,5	54,0	1,5
7	45,0	46,0	1,0	47,5	48,5	1,0
8	53,5	54,0	0,5	58,5	58,5	0,0
9	59,0	59,5	0,5	61,5	62,5	1,0
Moyenne	50,2	50,4	0,2	54,3	54,3	0,1
Ecart-type	4,8	4,8	0,8	4,9	4,8	0,9
Significativité		p = 0,454			p = 0.796	-,-

Tableau 37 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant du groupe CI à 15 cm et 20 cm.

	G	roupe CE -	Quadriceps no	n dominant		
Sujet	Périmètre en cm à 5 cm			Périmètre en cm à 10 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
10	42,5	42,5	0,0	48,5	48,0	-0,5
11	40,5	40,0	-0,5	43,5	42,5	-1,0
12	42,0	43,0	1,0	45,0	46,5	1,5
13	39,5	41,0	1,5	42,5	44,5	2,0
14	46,5	47,5	1,0	50,0	51,5	1,5
15	38,5	40,5	2,0	41,5	43,5	2,0
16	38,5	39,0	0,5	42,0	43,0	1,0
17	44,0	44,0	0,0	48,0	48,5	0,5
18	41,5	43,0	1,5	47,0	48,5	1,5
Moyenne	41,5	42,3	0,8	45,3	46,3	0,9
Ecart-type	2,6	2,6	0,8	3,1	3,1	
Significativité		p = 0.041		~,*	p = 0.043	1,1

Tableau 38 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CE à 5 cm et 10 cm.

Sujet	Périmètre en cm à 15 cm			Périmètre en cm à 20 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
10	54,5	54,0	-0,5	59,5	59,0	-0,5
11	46,5	46,0	-0,5	50,5	50,0	-0,5
12	49,0	50,0	1,0	52,5	54,0	1,5
13	47,5	49,0	1,5	51,5	52,5	1,0
14	55,0	56,5	1,5	59,0	60,5	1,5
15	46,5	48,5	2,0	50,5	52,0	1,5
16	45,5	46,0	0,5	48,5	49,5	1,0
17	51,5	52,5	1,0	55,0	56,0	1,0
18	53,5	54,5	1,0	56,0	57,5	1,5
Moyenne	49,9	50,8	0,8	53,7	54,6	0,9
Ecart-type	3,7	3,8	0,9	3,9	3,9	0,8
Significativité		p = 0.032		-,-	p = 0.023	0,0

Tableau 39 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CE à 15 cm et 20 cm.

Sujet	Périmètre en cm à 5 cm			Périmètre en cm à 10 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
10	43,5	44,5	1,0	49,5	50,0	0,5
11	40,5	40,0	-0,5	43,5	43,5	0,0
12	43,5	43,0	-0,5	47,0	47,0	0,0
13	39,5	41,0	1,5	42,5	43,5	1,0
14	45,5	46,5	1,0	50,0	50,5	0,5
15	39,0	40,0	1,0	44,0	44,5	0,5
16	39,5	39,0	-0,5	42,5	42,0	-0,5
17	43,0	43,0	0,0	47,0	47,5	0,5
18	42,0	42,0	0,0	47,0	47,5	0,5
Moyenne	41,8	42,1	0,3	45,9	46,2	0,3
Ecart-type	2,3	2,4	0,8	2,9	3,0	0,4
Significativité		p=0,198			p = 0.071	,

Tableau 40 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant du groupe CE à 5 cm et 10 cm.

Sujet	Périmètre en cm à 15 cm			Périmètre en cm à 20 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
10	54,5	55,0	0,5	59,5	60,0	0,5
11	46,5	47,0	0,5	50,5	51,0	0,5
12	51,0	50,5	-0,5	54,0	53,5	-0,5
13	47,5	48,0	0,5	52,5	53,5	1,0
14	54,5	54,5	0,0	58,0	58,5	0,5
15	49,0	49,0	0,0	52,0	52,5	0,5
16	46,0	45,5	-0,5	49,5	49,0	-0,5
17	51,0	52,0	1,0	55,0	56,0	1,0
18	53,5	54,0	0,5	56,5	57,0	0,5
Moyenne	50,4	50,6	0,2	54,2	54,6	0,4
Ecart-type	3,3	3,5	0,5	3,4	3,6	0,5
Significativité	The second secon	p = 0.240	L	<u> </u>	p = 0.080	

Tableau 41 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant du groupe CE à 15 cm et 20 cm.

Sujet		Périmètre en cm à 5 cm			on dominant Périmètre en cm à 10 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution	
19	45,5	45,0	-0,5	50,5	50,0	-0,5	
20	40,0	40,5	0,5	44,5	45,0	0,5	
21	44,0	43,5	-0,5	49,0	49,0	0,0	
22	41,5	41,0	-0,5	46,0	45,5	-0,5	
23	51,0	51,0	0,0	57,0	57,5	0,5	
24	41,5	42,0	0,5	45,5	46,0	0,5	
25	39,5	40,0	0,5	43,5	44,0	0,5	
Moyenne	43,3	43,3	0,0	48,0	48,1	0,1	
Ecart-type	4,0	3,8	0,5	4,7	4,7	0,5	
Significativité		p = 1,000		.,.	p = 0.484	0,5	

Tableau 42 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CO à 5 cm et 10 cm.

Sujet	Périmètre en cm à 15 cm			Périmètre en cm à 20 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
19	55,5	55,5	0,0	59,5	60,0	0,5
20	49,0	49,0	0,0	53,5	53,5	0,0
21	54,5	54,5	0,0	59,0	59,0	0,0
22	50,5	50,0	-0,5	55,0	54,0	-1,0
23	61,5	62,0	0,5	66,0	66,0	0,0
24	49,0	49,5	0,5	52,5	53,5	1,0
25	47,5	48,0	0,5	50,0	50,5	0,5
Moyenne	52,5	52,6	0,1	56,5	56,6	0,1
Ecart-type	5,0	5,0	0,4	5,4	5,3	0,6
Significativité		p = 0,424		-,.	p = 0.710	0,0

Tableau 43 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant du groupe CO à 15 cm et 20 cm.

Sujet	Périn	Périmètre en cm à 5 cm			Périmètre en cm à 10 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution	
19	45,0	45,0	0,0	51,0	51,0	0,0	
20	41,0	41,0	0,0	45,5	45,5	0,0	
21	44,5	44,5	0,0	50,0	49,5	-0,5	
22	41,5	40,5	-1,0	46,0	45,5	-0,5	
23	51,5	51,5	0,0	57,0	57,0	0,0	
24	41,5	42,0	0,5	45,5	46,0	0,5	
25	40,0	40,0	0,0	45,0	45,0	0,0	
Moyenne	43,6	43,5	-0,1	48,6	48,5	-0,1	
Ecart-type	4,0	4,0	0,4	4,4	4,4	-	
Significativité		p = 1,000		3,7	p = 0.773	0,3	

Tableau 44 : évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant du groupe CO à 5 cm et 10 cm

Sujet	Périmètre en cm à 15 cm			Périmètre en cm à 20 cm		
	Initiale	Finale	Evolution	Initiale	Finale	Evolution
19	54,5	55,0	0,5	59,0	60,0	1,0
20	49,0	49,5	0,5	53,0	53,0	0,0
21	55,5	55,5	0,0	60,0	59,5	-0,5
22	50,0	49,5	-0,5	54,5	54,0	-0,5
23	61,5	61,5	0,0	65,5	66,0	0,5
24	49,5	49,5	0,0	52,5	53,0	0,5
25	49,0	48,5	-0,5	51,0	51,0	0,0
Moyenne	52,7	52,7	0,0	56,5	56,6	0,1
Ecart-type	4,7	4,8	0,4	5,2	5,4	0,6
ignificativité	The state of the s	p = 1,000	· ·		p = 0.572	0,0

Périmè	etre initiale à 5 cm -	Quadriceps non doi	minant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,565	p = 0.311
Groupe CE	p = 0,565		p = 0.456
Groupe CO	p = 0.311	p = 0.456	

Tableau 46 : comparaison du périmètre initiale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

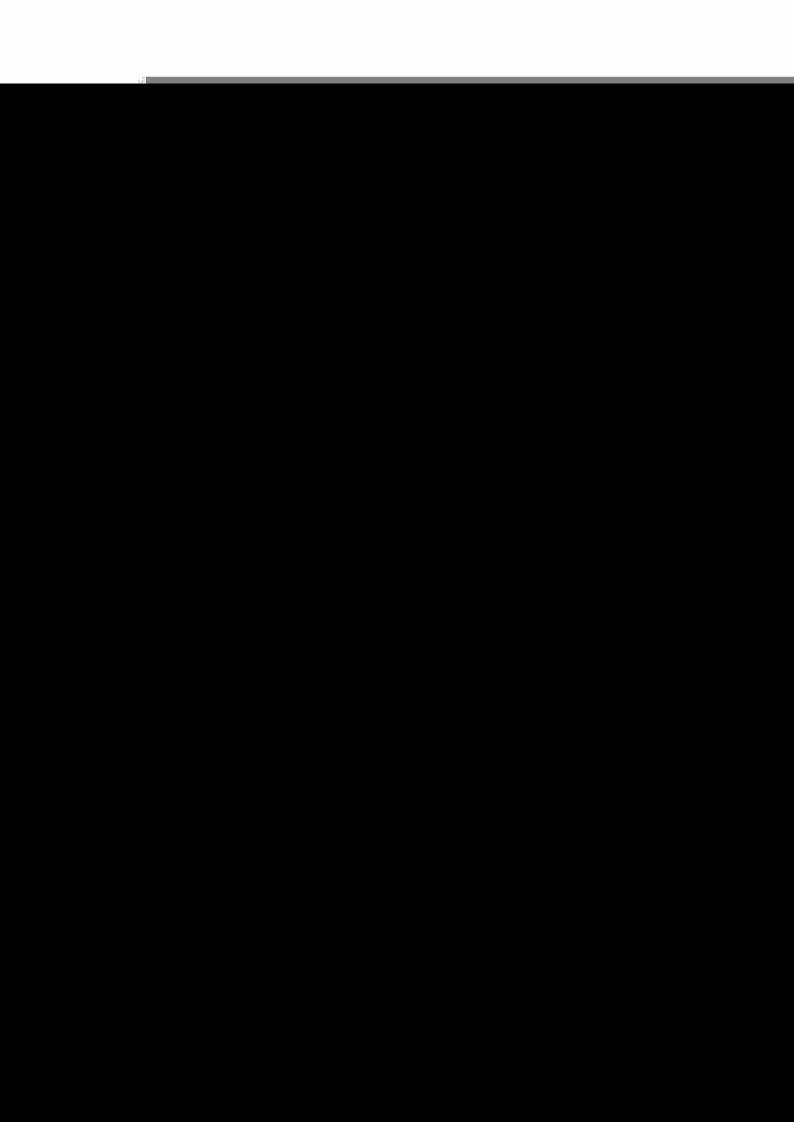
Périmè	tre initiale à 10 cm	- Quadriceps non do	minant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,929	p = 0.244
Groupe CE	p = 0.929		p = 0.223
Groupe CO	p = 0,244	p = 0,223	

Tableau 47 : comparaison du périmètre initiale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

Périmè	tre initiale à 15 cm	- Quadriceps non do	minant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,595	p = 0.243
Groupe CE	p = 0,595		p = 0.242
Groupe CO	p = 0,243	p = 0,242	

Tableau 48 : comparaison du périmètre initiale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 1,000	p = 0.340
Groupe CE	p = 1,000		p = 0.339
Groupe CO	p = 0.340	p = 0.339	1 -,



Périmètre finale à 5 cm - Quadriceps non dominant				
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0,535	p = 0.395	
Groupe CE	p = 0,535		p = 0.710	
Groupe CO	p = 0,395	p = 0.710		

Tableau 50 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

Périmètre finale à 10 cm - Quadriceps non dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,506	p = 0.221
Groupe CE	p = 0,506		p = 0.397
Groupe CO	p = 0,221	p = 0.397	1

Tableau 51 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

Périmètre finale à 15 cm - Quadriceps non dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,534	p = 0.340
Groupe CE	p = 0,534		p = 0,490
Groupe CO	p = 0,340	p = 0.490	

Tableau 52 comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

Périmè	etre finale à 20 cm -	Quadriceps non doi	ninant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,723	p = 0.396
Groupe CE	p = 0,723		p = 0.458
Groupe CO	p = 0,396	p = 0,458	• ,

Tableau 53 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 20 cm.

Périmètre finale à 5 cm - Quadriceps dominant				
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0.535	p = 0.340	
Groupe CE	p = 0,535		p = 0.588	
Groupe CO	p = 0,340	p = 0.558	•	

Tableau 58 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

Périmètre finale à 10 cm - Quadriceps dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,506	p = 0,222
Groupe CE	p = 0,506		p = 0.340
Groupe CO	p = 0,222	p = 0.340	

Tableau 59 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

Périmètre finale à 15 cm - Quadriceps dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,658	p = 0.262
Groupe CE	p = 0,658		p = 0.313
Groupe CO	p = 0,262	p = 0.313	. ,,,

Tableau 60 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

Périmètre finale à 20 cm - Quadriceps dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0.859	p = 0.367
Groupe CE	p = 0.859		p = 0.524
Groupe CO	p = 0.367	p = 0,524	

Tableau 61 : comparaison du périmètre finale de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 20 cm.

Périmètre à 5 cm - Evolution - Quadriceps non dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,208	p = 0.475
Groupe CE	p = 0,208		p = 0.067
Groupe CO	p = 0,475	p = 0,067	

Tableau 62 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

		Périmètre à 10 cm - Evolution - Quadriceps non dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO		
Groupe CI		p = 0.179	p = 0.585		
Groupe CE	p = 0,179		p = 0.083		
Groupe CO	p = 0.585	p = 0.083			

Tableau 63 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

	Périmètre à 15 cm - Evolution - Quadriceps non dominant			
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0,160	p = 0,620	
Groupe CE	p = 0,160		p = 0.076	
Groupe CO	p = 0.620	p = 0,076		

Tableau 64 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

Périmètre	e à 20 cm - Evolutio	n - Quadriceps non	dominant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,144	p = 0,691
Groupe CE	p = 0,144		p = 0.059
Groupe CO	p = 0,691	p = 0.059	

Tableau 65 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps non dominant des groupes CI, CE et CO à 20 cm.

Périmè	ètre à 5 cm - Evolut	ion - Quadriceps doi	ninant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0,857	p = 0.376	
Groupe CE	p = 0,857		p = 0.505	
Groupe CO	p = 0,376	p = 0.505		

Tableau 66 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 5 cm.

Périmè	tre à 10 cm - Evolu	tion - Quadriceps do	minant
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO
Groupe CI		p = 0,819	p = 0.344
Groupe CE	p = 0.819		p = 0.065
Groupe CO	p = 0,344	p = 0.065	

Tableau 67 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 10 cm.

Périmè	tre à 15 cm - Evolu	tion - Quadriceps do	minant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0,963	p = 0.658	
Groupe CE	p = 0.963		p = 0.373	
Groupe CO	p = 0,658	p = 0.373		

Tableau 68 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 15 cm.

Périmè	tre à 20 cm - Evolu	tion - Quadriceps do	minant	
Significativité	Groupe CI	Groupe CE	Groupe CO	
Groupe CI		p = 0,416	p = 0.746	
Groupe CE	p = 0.416		p = 0.371	
Groupe CO	p = 0,746	p = 0.371		

Tableau 69 : comparaison de l'évolution du périmètre de la cuisse du quadriceps dominant des groupes CI, CE et CO à 20 cm.

ANNEXE 8 : pénibilité des épreuves de fatigue.

Groupe CI								
Sujet	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
1	4,0	5,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	4,0
2	8,0	8,0	9,0	9,0	8,0	9,0	9,0	8,0
3	6,0	5,0	4,0	7,0	5,0	4,0	6,0	7,0
4	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	9,0	9,0	10,0
5	9,0	7,0	8,0	9,0	8,0	7,0	8,0	8,0
6	3,0	4,0	5,0	3,0	5,0	2,0	3,0	2,0
7	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0	2,0
8	6,0	7,0	7,0	7,0	5,0	6,0	7,0	7,0
9	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	5,0	4,0	4,0

Tableau 70 : appréciation de la pénibilité ressentie lors des EF par le groupe CI.

Groupe CE								
Sujet	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
10	6,0	7,0	6,0	7,0	5,0	7,0	6,0	5,0
11	7,0	5,0	6,0	8,0	9,0	7,0	7,0	5,0
12	7,0	7,0	8,0	9,0	10,0	8,0	8,0	9,0
13	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
14	4,0	6,0	3,0	5,0	4,0	3,0	3,0	5,0
15	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	6,0	4,0	5,0
16	9,0	8,0	8,0	8,0	10,0	10,0	9,0	9,0
17	8,0	8,0	9,0	9,0	8,0	9,0	9,0	9,0
18:	7,0	7,0	8,0	6,0	7,0	8,0	8,0	8.0

Tableau 71 : appréciation de la pénibilité ressentie lors des EF par le groupe CE.

用水平 或量。	Groupe CI	Groupe CE	Significativité p =
EF1	$5,6 \pm 2,2$	6.9 ± 1.4	0,161
EF2	$5,6 \pm 1,7$	6.9 ± 0.9	0,104
EF3	$5,8 \pm 2,2$	$7,1 \pm 1,8$	0,235
EF4	$6,0 \pm 2,5$	7.6 ± 1.3	0,208
EF5	$5,6 \pm 1,9$	$7,7 \pm 2,1$	0,057
EF6	$5,4 \pm 2,6$	$7,3 \pm 2,0$	0,119
EF7	$6,0 \pm 2,4$	6.9 ± 2.1	0,474
EF8	$5,8 \pm 2,9$	7.0 ± 1.9	0,244

Tableau 72 : comparaison de la pénibilité ressentie lors des EF par les groupes CI et CE.