

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS D'UN PROGRAMME EN ÉLECTROSTIMULATION  
SUITE À UNE RUPTURE DU TENDON D'ACHILLE

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR  
PIERRE-MARC VEILLETTE

DÉCEMBRE 2008

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

L'auteur désire remercier M. Alain Steve Comtois professeur en physiologie de l'exercice à l'UQÀM pour sa collaboration et son appui lors de la réalisation de ce projet. L'auteur tient également à remercier l'ensemble des professeurs du département de kinanthropologie de l'UQÀM qui l'ont aidé lors des cours de la maîtrise ou du baccalauréat. L'auteur remercie grandement M. David Jones, thérapeute du sport à l'Université Concordia, pour sa collaboration et son aide dans le domaine de la réadaptation suite à une rupture du tendon d'Achille. Finalement, l'auteur remercie tous les sujets qui ont bien voulu participer à la recherche (ou l'étude pilote) sans qui le projet n'aurait pas existé.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	x
RÉSUMÉ.....	xi
INTRODUCTION.....	1
Introduction.....	1
Énoncé du problème.....	2
Hypothèse.....	3
Limites.....	3
Importance.....	3
CHAPITRE I	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Éléments de connaissance sur la contraction musculaire et l'influence du système nerveux central et périphérique .....	5
1.1.1 Mécanisme régissant la force musculaire.....	16
1.1.2 Mécanismes régissant la réparation et l'entraînement musculaire .....	19
1.1.3 Principes d'entraînement .....	23

1.2	Éléments de connaissance en électrostimulation.....	24
1.2.1	Caractéristiques du courant employé en électrostimulation .....	24
1.2.2	Effet de la durée de la stimulation sur la force de contraction musculaire ....	25
1.2.3	Impédance .....	26
1.2.4	Placement des électrodes .....	27
1.2.5	Effet de la fréquence de stimulation sur la force de contraction musculaire...	29
1.2.6	Effet de l'intensité sur la force de contraction musculaire.....	31
1.2.7	Effets de différents entraînements en électrostimulation.....	32
1.2.8	Électrostimulation d'un muscle atrophié.....	36
1.2.9	Effets de jumeler un entraînement en contraction volontaire à un entraînement en électrostimulation.....	37
1.3	Éléments de connaissance sur la rupture du tendon d'Achille.....	37
1.3.1	Bref historique de la rupture du tendon d'Achille.....	38
1.3.2	Traitements actuels suite à une rupture du tendon d'Achille.....	39
1.4	Conclusion.....	45
CHAPITRE II		
MÉTHODE.....		47
2.1	Introduction.....	47
2.2	Sujets.....	47
2.2.1	Critères d'inclusion.....	47
2.2.2	Critères d'exclusion .....	48
2.2.3	Aspects déontologique et consentement.....	48

2.3	Conditions.....	49
2.3.1	Groupe expérimental.....	49
2.3.2	Groupe témoin.....	53
2.4	Mesures.....	53
2.4.1	Mesures de la force de la jambe.....	53
2.4.2	Mesures de volume de la jambe.....	54
2.5	Procédures.....	56
2.5.1	Éthique et consentement.....	56
2.5.2	Pré-test .....	57
2.5.3	Entraînement en électrostimulation.....	62
2.5.4	Test intermédiaire.....	63
2.5.5	Post-Test.....	64
2.5.6	Analyse statistique.....	64
CHAPITRE III RÉSULTATS ET ANALYSES.....		65
3.1	Rappel des hypothèses de la recherche et de la méthode utilisée.....	65
3.2	Résultats et analyses.....	66
3.2.1	Résultats des mesures de force concentrique.....	66
3.2.2	Analyse du gain en force concentrique.....	69
3.2.3	Résultats des mesures en force excentrique.....	74
3.2.4	Analyse du gain en force excentrique.....	77

3.2.5	Résultats des mesures de force isométrique.....	81
3.2.6	Analyse du gain en force isométrique.....	84
3.2.7	Résultats des mesures de volume.....	88
3.2.8	Analyse du gain en volume.....	91
CHAPITRE IV		
DISCUSSION.....		96
4.1	Synthèse des résultats obtenus.....	96
4.2	Discussion sur le gain en force.....	96
4.3	Discussion sur le gain de volume.....	98
4.4	Limites de l'étude.....	99
CONCLUSION.....		102
RÉFÉRENCES.....		103
ANNEXES.....		116
Annexe 1 : Formulaire de consentement.....		116
Annexe 2 : Suivi des sujets.....		120
Annexe 3 : Feuille de test.....		121
Annexe 4 : Journal de bord.....		122
Annexe 5 : Acceptation du projet par le comité d'éthique.....		123

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
3.1	Évolution de la force concentrique de la jambe.....	67
3.2	Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force concentrique.....	70
3.3	Synthèse des différences significatives des gains en force concentrique entre les groupes, les tests et les côtés.....	71
3.4	Évolution de la force excentrique de la jambe.....	75
3.5	Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force excentrique.....	77
3.6	Synthèse des différences significatives des gains en force excentrique entre les groupes, les tests et les côtés.....	79
3.7	Évolution de la force isométrique de la jambe .....	82
3.8	Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force isométrique.....	84
3.9	Synthèse des différences significatives des gains en force isométrique entre les groupes, les tests et les côtés .....	86
3.10	Évolution de la circonférence de la jambe .....	89
3.11	Analyse de la variance intra et inter groupes pour la circonférence.....	91



3.12	Synthèse des différences significatives des gains de volume entre les groupes, les tests et les côtés .....	93
------	--	----

## LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique	Page
3.1 Évolution de la force concentrique de la jambe.....	68
3.2 Analyse du gain en force concentrique.....	72
3.3 Évolution de la force excentrique de la jambe.....	76
3.4 Analyse du gain en force excentrique.....	79
3.5 Évolution de la force isométrique de la jambe.....	83
3.6 Analyse du gain en force isométrique.....	87
3.7 Évolution de la circonférence de la jambe.....	90
3.8 Analyse du gain en volume.....	93

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Tension développée dans le muscle de la jambe avec stimulation du motoneurone à différentes fréquences.....	7
1.2	Courant enregistré dans le triceps d'un humain avec une électrode aiguille durant une contraction volontaire graduellement augmentée.....	8
1.3	Relation entre «l'économie» et la fréquence de stimulation (muscle à 18°) .....	9
1.4	Relation entre «l'économie» et la fréquence de stimulation (muscle à 0°).....	10
1.5	Représentation schématique de la «chaîne» impliquée dans les contractions volontaires .....	14
1.6	Relation longueur du muscle / force .....	18
1.7	Cellule satellite .....	19
1.8	Cycle des cellules satellites .....	20
1.9	Ondes biphasiques balancées avec un 0 net dans la direction du courant .....	25

1.10	Courbe intensité-durée pour stimuler le nerf .....	26
1.11	Point moteur des jumeaux et du soléaire .....	29
1.12	Courant biphasique .....	30
2.1	Onde rectangulaire asymétrique biphasique.....	50
2.2	Exemple de journal de bord .....	52
2.3	Différents sites utilisés pour la prise de circonférence permettant d'évaluer la composition corporelle.....	55
2.4	Prise du pli cutané.....	56

## RÉSUMÉ

L'électrostimulation est une méthode de mieux en mieux comprise en physiologie humaine. D'un autre côté, la rupture du tendon d'Achille amène chez la personne l'ayant subi une perte de force et de volume chronique. L'objet de ce projet fut d'observer si la force et le volume d'une jambe peuvent être améliorés avec l'aide d'un entraînement en électrostimulation. 9 sujets divisés en deux groupes (expérimental = 6, témoin = 3) ont subi un pré-test où fut mesurée leur force de contraction concentrique, excentrique et isométrique lors du mouvement de flexion plantaire. Le volume de la jambe fut également mesuré par la prise de la circonférence du mollet au niveau du ventre des gastrocnémiens. Le groupe expérimental a suivi un entraînement en électrostimulation des fléchisseurs plantaires d'une seule jambe à une fréquence de 50 Hz, 5 secondes de travail, 15 secondes de repos pendant 15 minutes. L'entraînement eu lieu 3 fois par semaine durant 8 semaines. Le groupe témoin ne suivit aucun entraînement particulier durant les 8 semaines. Un test identique au pré test fut repassé 4 semaines (test intermédiaire) après le début de l'entraînement (ou du non-entraînement pour le groupe témoin). L'ensemble des mesures de force et de volume (post-test) fut repris après les 8 semaines d'entraînement (ou de non entraînement pour le groupe témoin). Une analyse comparative de la force et du volume des deux jambes avant et après la période de 8 semaines fut effectuée pour les deux groupes. Nous avons observé une augmentation significative de force concentrique et isométrique pour la jambe entraînée par électrostimulation du groupe expérimental. Aucun autre gain de force ne fut significatif pour les autres groupes. Aucun gain de volume ne fut significatif pour aucun groupe. Ces résultats laissent croire que l'électrostimulation peut améliorer la force d'une jambe et que cette technique pourrait être employée pour aider ceux ayant subi une rupture du tendon d'Achille. D'autres recherches sont nécessaires sur des personnes ayant subi une rupture du tendon d'Achille pour observer si un gain de volume serait possible et si les paramètres de stimulation pourraient être améliorés.

Mots-clés : électrostimulation, rupture tendon d'Achille, triceps sural, force

## INTRODUCTION

### Contexte général

L'électrostimulation, d'abord utilisé par les Grecs par le biais de poissons torpilles ou d'anguilles électriques, est un procédé de mieux en mieux compris et étudié dans divers domaines de la physiologie humaine, que ce soit pour des fins d'entraînement sportif ou encore de réadaptation suite à une atrophie musculaire. Cette étude vise d'abord un approfondissement des connaissances pratiques actuelles en électrostimulation. Ce projet de recherche observe si une personne ayant subi une rupture du tendon d'Achille peut obtenir des changements positifs à la jambe blessée par le biais de l'électrostimulation.

### Objet de la recherche

L'objet de cette recherche est de vérifier si une personne ayant subi une rupture du tendon d'Achille peut augmenter la force et le volume de sa jambe blessée par un entraînement en électrostimulation.

### Connaissance spécifique

Il a été vérifié que l'électrostimulation peut provoquer un gain de force (Valli et al., 2002, Maffiuletti et al., 2000, Maffiuletti, Pensini et Martin, 2002, Colson, Martin et Van Hoecke, 2000, Paillard et al., 2004), éviter l'atrophie d'un muscle dénervé (Decherchi et al., 2002) et minimiser celle d'un muscle longtemps immobilisé (Vanderthommen et al., 1999).

Sachant qu'un des tendons les plus souvent blessé est le tendon d'Achille (Wren et al., 2003), il est intéressant d'étudier la réadaptation de ce tendon en particulier. Lorsque survient une rupture du tendon d'Achille, la thérapie classique consiste en une immobilisation de la

jambe et de la cheville durant 6 à 8 semaines (Järvinen et al., 2001, Schepesis, Jones et Haas, 2002, Saltzman et Tearse, 1998) suivi de 3 à 4 semaines où la cheville passe graduellement du mouvement de flexion plantaire à la position neutre. Une atrophie musculaire survient lors de la période d'immobilisation (même après 6 semaines), on observe plus particulièrement une atrophie des fibres musculaire de type I (Schepesis, Jones et Haas, 2002). Également, certaines recherches ont remarqué une dégénérescence des fibres collagènes et une calcification du tendon (Järvinen et al., 2001). Cette atrophie du muscle entraîne par conséquent une perte de force (Decherchi et al., 2003). Nous savons qu'un retour rapide effectué à l'aide d'exercices fonctionnels avec charge permet de retrouver 97% de la force d'origine après 12 mois (Schepesis, Jones et Haas, 2002), sinon la convalescence peut s'allonger et il est commun de constater que la force du mollet n'est pas totalement retrouvée même après plus de 12 mois (Saltzman et Tearse, 1998, Bressel et McNair, 2001). Il est cependant improbable que le mollet retrouve complètement le volume qu'il avait avant la rupture du tendon (Mortensen, Skov et Jensen, 1999), particulièrement si l'immobilisation est prolongée (De Bisschop et al., 2001).

### Énoncé du problème

Suite à une rupture du tendon d'Achille, la perte de force et de volume musculaire de la jambe blessée amène plusieurs inconvénients aux personnes ayant subi ce traumatisme (abandon de l'activité sportive, changement dans les habitudes de vie - changement dans la mécanique de la marche, répartition du poids sur une jambe, sous utilisation de la jambe blessée, etc.). Donc, développer des moyens de réadaptation plus rapides et plus efficaces aiderait ces personnes à retrouver plus rapidement un mode de vie actif et ainsi contribuer à l'accroissement de leur niveau de santé générale.

### Hypothèse

Augmentation de la force et le volume de la jambe blessée par un entraînement en électrostimulation suite à une rupture du tendon d'Achille.

## Limites

Les limites de l'étude sont présentées ici ainsi que les moyens qui ont été utilisés afin de réduire l'impact de ces limites. Plusieurs facteurs ont été pris en considérations afin de ne pas compromettre la validité de notre recherche. Les attentes du chercheur et des sujets auraient pu avoir un impact significatif sur les résultats. Afin d'éviter que ces attentes aient faussées les données, des mesures quantitatives, objectives, fidèles et valides ont été prises pour vérifier l'hypothèse de recherche, indépendamment des attentes du chercheur. Chaque sujet a été informé du but de la recherche et de l'impossibilité pour le chercheur de garantir les résultats finaux. Afin de réduire des fluctuations de l'instrumentation, chaque mesure a été prise plusieurs fois (minimum de 3) afin d'assurer la plus grande fidélité possible. Comme chacun des sujets choisis aurait dû avoir subi une rupture du tendon d'Achille, nous avons anticipés d'agir avec prudence lors de la généralisation sur l'application de ce procédé sur une personne n'ayant pas subi de rupture ou sur l'application de ce protocole à un autre muscle du corps humain. De plus, la perte ou l'abandon de sujets auraient pu nuire à l'échantillonnage et si une perte de sujet aurait été trop grande, il aurait fallu se garder d'affirmer nos résultats comme étant définitivement représentatifs de la population générale. La réadaptation d'une rupture du tendon d'Achille étant un procédé complexe, des variables externes auraient pu influencer les résultats de notre recherche. Pour assurer la plus grande validité interne possible, un entraînement en réadaptation physique a été suivi par l'ensemble des sujets. Cet entraînement a servi à éviter que le niveau de réadaptation soit différent d'un sujet à l'autre, ce qui aurait pu influencer significativement la force des sujets. Comme nous tenons à vérifier que l'entraînement en électrostimulation provoque un gain de force, il est important que le paramètre de la réadaptation ait aussi été contrôlé.

## Importance

Les blessures au niveau du tendon d'Achille sont en hausse depuis les cents dernières années en particulier dans les pays développés. En effet, avant 1900, il était très peu commun de rencontrer ce type de blessure. La raison principale de cette augmentation est due à l'accroissement du temps consacré aux loisirs et aux sports. En effet, la plupart du temps (de



60 à 75 % du temps selon Järvinen et al., 2001 ), ce sont des personnes actives qui subissent une rupture du tendon d'Achille.

Pour plusieurs sportifs, ce type de blessure amène la fin d'une carrière ou un retour difficile, souvent sans jamais retrouver le même niveau de performance. La réadaptation prend souvent plus d'un an et on dénote chez plusieurs des pertes de force chronique de la jambe blessée (Bressel et McNair, 2001). Dans les meilleurs cas le retour à la force de contraction initiale du triceps sural sera possible. Il est cependant aujourd'hui improbable que le mollet retrouve complètement le volume qu'il avait avant la rupture du tendon (Mortensen, Skov et Jensen, 1999), particulièrement si l'immobilisation est prolongée (De Bisschop et al., 2001). L'entraînement par électrostimulation pourrait donc être une alternative intéressante pour tous ceux ayant subi une rupture du tendon d'Achille ou une immobilisation prolongée ayant causé l'atrophie du muscle, d'où l'intérêt de ce projet de recherche.

Enfin, ce projet est justifié dans son importance pour les deux aspects suivants : d'abord une pertinence pour les sportifs ayant subi ce type de blessure, peut-être un moyen alternatif pouvant leur venir en aide. Ensuite, une pertinence au niveau de l'avancement des connaissances actuelles sur l'entraînement en électrostimulation dans un cadre de réadaptation pour obtenir un gain en force et en volume musculaire.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Afin de répondre à notre question de recherche, la prochaine section vise à présenter les connaissances nécessaires à l'élaboration du projet de recherche. Nous allons couvrir trois grands sujets distincts, soit les éléments de connaissance en physiologie générale (influence du système nerveux central et périphérique, principes et mécanismes d'entraînement, etc.), les éléments de connaissance spécifique à l'électrostimulation et les éléments de connaissance sur la rupture du tendon d'Achille.

#### 1.1 Éléments de connaissance sur la contraction musculaire et l'influence du système nerveux central et périphérique

Le système nerveux central et périphérique est le principal responsable de tout mouvement exécuté par le corps humain. Bien que le fonctionnement général des neurones, des motoneurones et de la plaque motrice soit en bonne partie expliquée, sa complexité apporte plusieurs questionnements dont nous n'avons toujours pas les réponses aujourd'hui. En faire une revue détaillée nécessiterait plusieurs volumes. Le but de cette section est de faire la revue des grands concepts qui ont été élucidés car c'est sur la base de ces concepts que reposent les principes d'entraînement et d'électrostimulation.

L'influence du système nerveux central fut dans les premières fois étudiées scientifiquement par Lombard en 1892. Avant ce temps, il était difficile de dire l'effet de différents paramètres (ex : de la température, de fumer un cigare, de manger certains aliments...) sur la force de contraction et la fatigue musculaire. Par des entraînements méthodiques, Lombard fit faire différent exercice sur une longue période de temps à des

sujets «sains» en prenant soins de les faire tenir un journal quotidien des activités faites. Il définit alors que la «fatigue» est présente lorsque le sujet est incapable de lever la charge une nouvelle fois. Lombard remarque que «l'agitation mentale» peut augmenter l'endurance volontaire.

Lombard cite également Mosso (1889) qui dans ces travaux de laboratoire a observé que lorsque le sujet se fatigue il est possible par un courant électrique de provoquer dans le muscle fatigué une contraction musculaire encore vigoureuse. Lombard en conclut qu'il y a une fatigue centrale avant la fatigue périphérique. Lombard en 1892 observe que la force des sujets varie dans la journée et est même plus grande vers la fin de l'après midi, bien qu'aujourd'hui la connaissance du cycle circadien et du rythme biologique est mieux connue (revue par Kelly, 2006), à cette époque cette observation apportait un questionnement.

En 1929, Adrian et Bronk observe sur la jambe d'un chat dénervé que l'augmentation de la fréquence de stimulation est proportionnelle à la force de contraction jusqu'à l'atteinte d'un plateau.

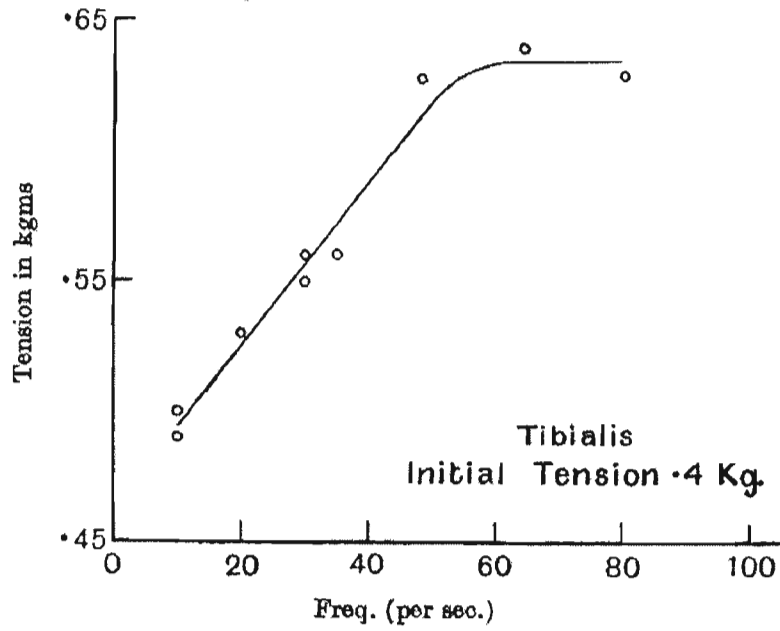


Fig. 10 A.

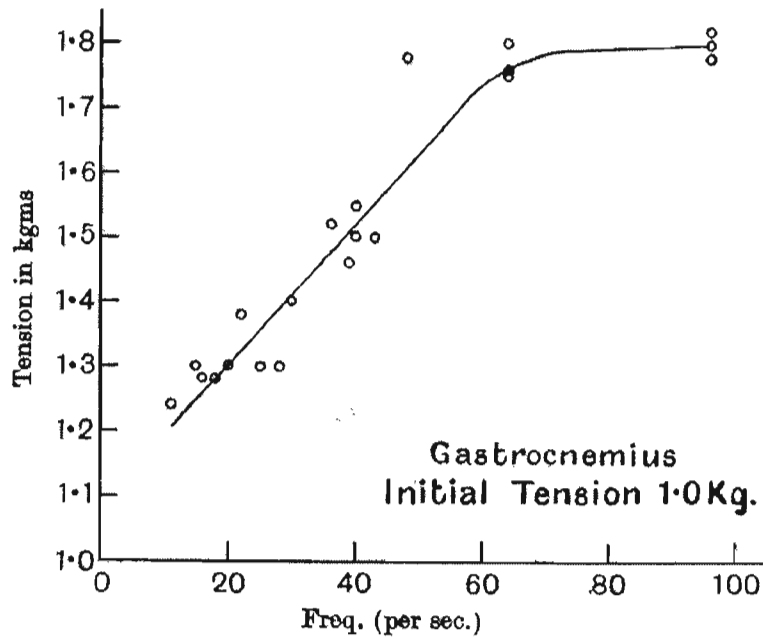


Fig. 10 B.

Figure 1.1- Tension développée dans le muscle de la jambe avec stimulation du motoneurone à différentes fréquences. Animal décérébré. A, tibialis anticus; B, gastrocnemius et soleus. Contraction non strictement isométrique (Adrian et Bronk, 1929).

Adrian et Bronk,, 1929, observent aussi que lorsque la force de contraction augmente, il y a plus de motoneurones activés, c'est-à-dire qu'il y a un plus grand recrutement d'unités motrices. Adrian et Bronk, 1929, établissent que l'augmentation de la force chez l'humain est également due à l'augmentation de recrutement des unités motrices.

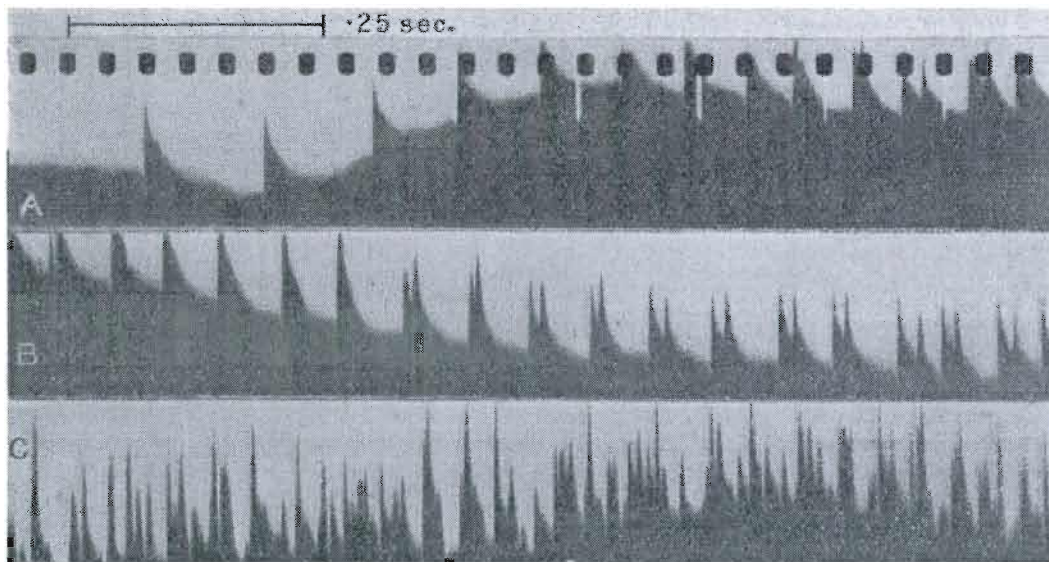


Figure 1.2- Courant enregistré dans le triceps d'un humain avec une électrode aiguille durant une contraction volontaire graduellement augmentée. A, Début de la contraction; B suivi; C, contraction maximale (Adrian et Bronk, 1929).

Bronk 1930, soutient l'efficacité musculaire atteint son niveau maximal lorsque la fréquence de stimulation de ses fibres est juste assez suffisante pour produire une contraction tétanique. Bronk définit l'économie comme la tension maintenu un temps donné divisé par la chaleur que la fibre musculaire produit, c'est-à-dire que moins le muscle produit de chaleur et plus il maintient une grande tension durant une longue période de temps et plus la fibre musculaire est efficace ou possède une grande économie. Par cette définition, Bronk, 1930 observe qu'il est moins coûteux à la fibre musculaire de maintenir la tétanie que de l'atteindre, cependant, une fois la tétanie atteinte, une augmentation de la fréquence de

stimulation va augmenter la force de contraction jusqu'à la force maximale, où aucune économie supplémentaire n'est réalisée si la fréquence augmente davantage.

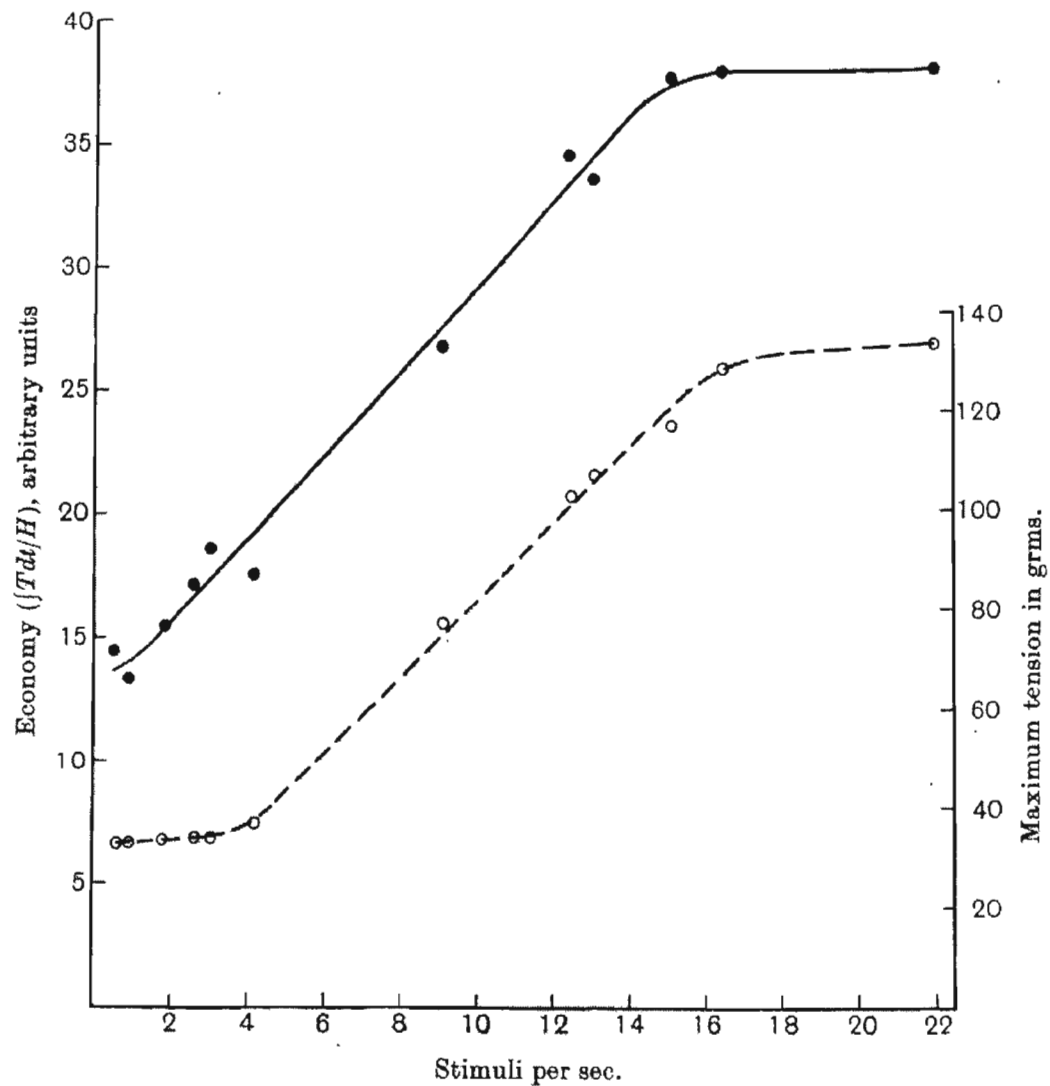


Figure 1.3- Ligne pleine : relation entre «l'économie» (voir texte) et la fréquence de stimulation. Ligne pointillée : relation entre la tension maximale développée durant chaque période de stimulation de 2 sec. et la fréquence. Mesure effectuée à 18 ° C. (Bronk, 1930).

Bronk, 1930, a répété les expérimentations pour observer que cette relation, bien qu'avec une moins grande différence était aussi présente à des températures plus basses comme à 0 ° C. et existait non seulement à la température de la pièce mais peu importe la température ambiante.

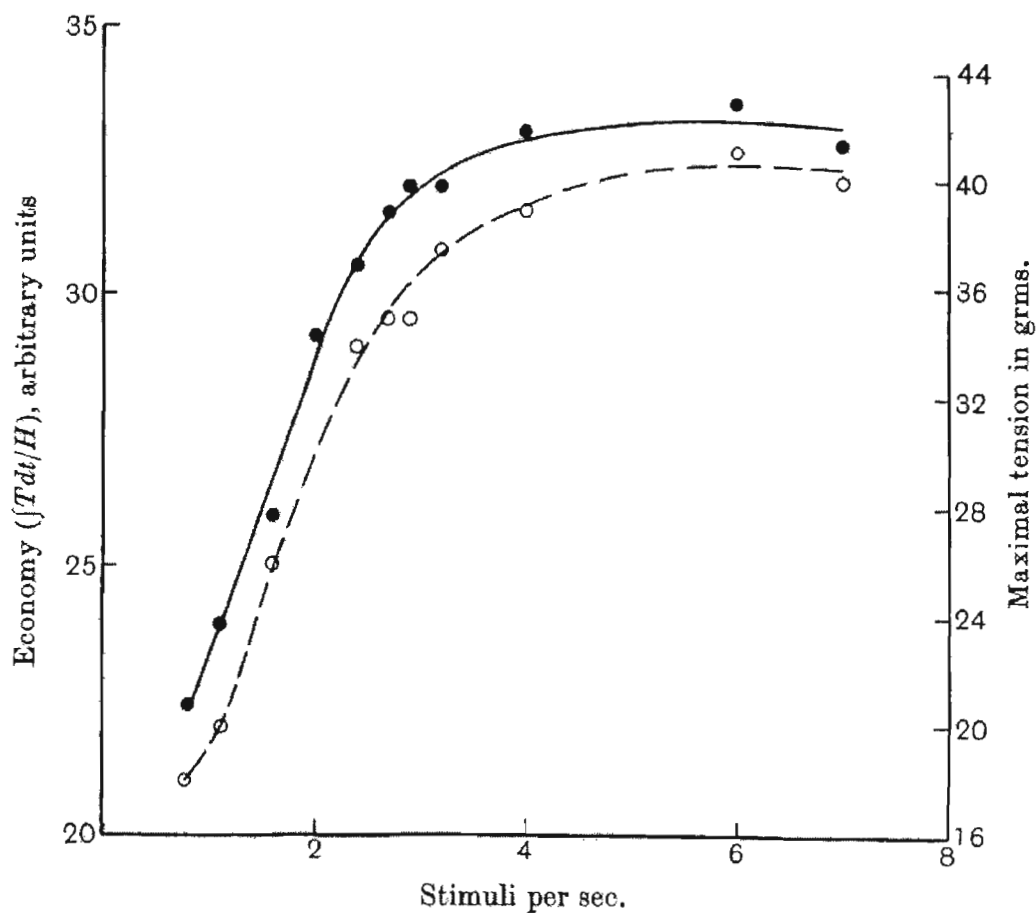


Figure 1.4- Muscle à 0° C. Ligne pleine : relation entre «l'économie» (voir le texte) et la fréquence de stimulation. Ligne pointillée : tension maximale développée à différentes fréquences. 5 sec. de temps de stimulation (Bronk, 1930).

Lippold, 1952, observe l'activité électrique de certain muscle superficiel avec l'aide d'un électromyographe. Il étudie la relation entre la tension isométrique produite par une contraction volontaire et la compare à l'électromyogramme produit lors de la contraction. Lors de 30 expérimentations sur différents sujet la relation est toujours directement linéaire. Lippold, 1952 en arrive à établir que lors d'une contraction volontaire, la tension produite est proportionnelle à l'activité électrique du muscle. Bigland et Lippold, 1954 observe ce même phénomène lors de contraction anisométrique.

En 1954, Merton fait une expérimentation en provoquant des contractions de l'adductor pollicis et observe qu'une contraction tétonique induite par électrostimulation de l'adductor pollicis produit une force équivalente à celle générée par une contraction volontaire.

Merton, 1954 observe également que la sensation de contraction maximale éprouvé chez un sujet est purement subjective et souvent la différence entre une contraction jugé «correcte» par un sujet et une contraction jugée «maximale» est inexistante si ce n'est que de la contraction d'autres muscles non impliqués dans le mouvement (tels les dents, le visage, les jambes...) et n'ajoute pas de force pour la contraction demandée, en plus de rapidement créer une baisse de la force de contraction et une sensation générale de fatigue.

Aussi Merton 1954 cite «lorsque la force tombe, l'électrostimulation du nerf ne peut pas la restaurer». Il conclut que la fatigue musculaire est périphérique et non centrale, sinon, la stimulation électrique aurait été en mesure de provoquer une nouvelle contraction ce qui n'est pas le cas. Pour ajouter au fait que la fatigue est périphérique, Merton 1954, observe que bloquer le flux sanguin vers le muscle contribue à empêcher la récupération suite à l'atteinte de la fatigue. L'auteur montre ainsi que ce sont les fibres musculaires qui fatiguent et non pas le système nerveux central.

Merton, 1954 observe que les fibres musculaires activées par le nerf qui est excité par l'impulsion contracte au maximum. Merton 1954 et Bigland et Lippold, 1954 observe qu'une contraction tétonique provoquée en utilisant la stimulation électrique est incapable de provoquer une force de contraction supérieure à celle d'une contraction volontaire. Même si



toutes les unités motrices sont recrutées en même temps lors de la stimulation électrique ce qui n'est pas le cas lors de contraction volontaire, la force maximale reste la même.

Merton, 1954 reporte aussi comme une évidence que la force de contraction maximale d'un muscle est inférieure à celle pouvant rupturer les tendons et les os et rejette l'idée reçue qu'une contraction concentrique maximale peut être suffisamment forte pour créer des déchirures tendineuses ou un bris osseux.

Les travaux de Desmedt et Godaux, 1977, sur la jambe et Milner-Brown Stein et Yemm, 1973 sur la contraction des muscles du dos de la main ont montré qu'il y a un ordre dans le recrutement des unités motrices. D'abord, ce sont des unités motrices de petit diamètre qui se dépolarise provoque une contraction de force faible. Lorsque la tâche augmente en intensité, des unités motrices de moyens diamètres sont recrutées en plus de celles de petit diamètre ce qui provoque une force de contraction supérieure. Finalement lors de contractions très fortes, il y a recrutement d'unités motrices à gros diamètres en plus de ceux à moyen et petit diamètre. Milner Brown et Yemm, 1973, observe aussi que les unités motrices à gros diamètre dites «rapides» ont un temps de contraction beaucoup plus court que les unités motrices plus petite. Ceci est vrai pour les contractions concentriques.

En 1999, Butler, McKenzie et Gandevia observe ce même ordre de recrutement pour des mouvements concentrique. Nardone et Schieppati, 1988 vérifie cet ordre de recrutement pour des contractions anisométriques.

Cooper et al., 1988 ont clairement montré que la force de contraction du muscle était en lien direct avec sa fréquence stimulation.

En 1997, McKenzie observe qu'une inspiration forcée à travers un tube avec une pression de plus en plus grande (jusqu'à 90% de la pression maximale inspiratoire) peut créer un échec de la tâche avec peu de fatigue dans les muscles inspiratoire. Ce fait montre que l'hypoventilation, la rétention de CO<sub>2</sub> et ultimement un échec de la tâche n'est pas simplement dépendant de l'incapacité du diaphragme à générer une force. La fatigue du

système nerveux périphérique n'est donc pas la seule cause possible d'un échec au niveau d'une tâche motrice quelconque.

Gandevia 2001 explique dans sa revue que la vraie force maximale ne peut s'obtenir avec le système nerveux central seulement. La force musculaire volontaire augmente avec l'entraînement, mais les mécanismes d'adaptation sont encore de nos jours controversés. De plus, il existe plusieurs différences interindividuelles.

Gandevia 2001, explique que la force est souvent soit mesurée de façon contrôlée avec des mouvements isométrique, concentrique, isocinétique ou parfois incontrôlée comme par exemple en levant simplement un poids plus lourd. La revue de Gandevia, 2001, explique que si la force excède ce qu'un muscle peut produire, cela doit être dû au système nerveux central, soit par un changement dans le recrutement des unités motrices, soit simplement par un apprentissage du mouvement. Ainsi, n'importe quel gain de force est à la fois dû au système nerveux central et périphérique.

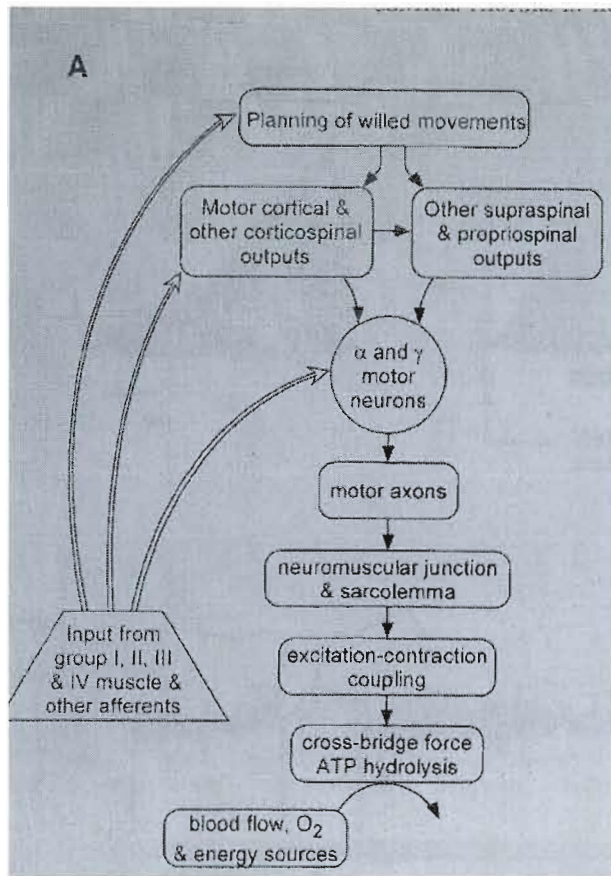


Figure 1.5- Représentation schématique de la «chaîne» impliquée dans les contractions volontaires. Une source majeure de rétroaction, provenant du muscle, est montrée agissant à trois niveaux dans le système nerveux central. (Gandevia, 2001)

Gandevia, 2001, explique qu'il est difficile de départir le rôle du système nerveux central et celui de la grosseur des fibres musculaires dans le gain en force. Gandevia, 2001 cite que six détails méthodologiques dont le chercheur doit tenir compte pour interpréter correctement une contraction «maximale» :

- 1) Tout effort maximal doit être accompagné par des explications et une pratique préalable;
- 2) La rétroaction de la performance doit être fournie durant l'effort (dispositif visuel clair) plutôt qu'avec un délai une fois l'effort fourni;

- 3) Des encouragement verbaux standardiser et appropriés doivent être donnés préférentiellement par le chercheur et les autres responsables, plutôt qu'une cassette audio (McKenzie et al., 1992).
- 4) Les sujets doivent avoir la permission de rejeter les efforts qu'ils ne pensent pas être «maxima», même avec attention, ceci arrive rarement;
- 5) Dans les études demandant des tests répétés dans la même session, ou demandant un groupe de sujets des précautions additionnelles doivent être prises. Le gain de n'importe quelle rétroaction visuelle en temps réel doit être varié pour que le sujet ne soit pas nécessairement conscient de la magnitude de n'importe quelle baisse de performance, le but étant de maximiser les performances.
- 6) Lors de tests répétés sur plusieurs sessions, semaines ou mois, l'accompagnement d'une récompense doit être considérée (Herbert, Dean et Gandevia, 1998).

Gandevia, 2001, souligne que ces six détails sont souvent ignorés. Gandevia, 2001, ajoute que sans une attention sur ces détails, il est inévitable que l'activation volontaire soit variable et soit sous-maximale depuis le départ de l'exercice.

Une autre influence incontestable du système nerveux central est observée lorsque on entraîne seulement le membre d'un seul côté du corps et que le membre controlatéral gagne lui aussi de façon significative de la force. Cet effet controlatéral a été vérifié lors d'un entraînement par contractions volontaires (Gandevia, 2001, Shima et al., 2002). Lors de l'entraînement d'un seul membre en électrostimulation, il y a aussi présence de cet effet controlatéral (Portmann, 1991, Selkowitz, 1989). On peut donc dire qu'il y a apprentissage du mouvement par le système nerveux central ce qui fait que le système nerveux central peut transférer cet apprentissage à un l'autre membre et qu'une augmentation de la mesure de force en découle.

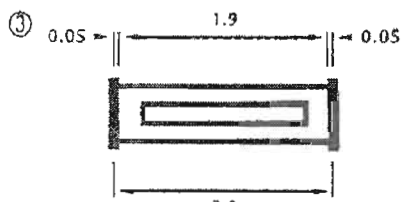
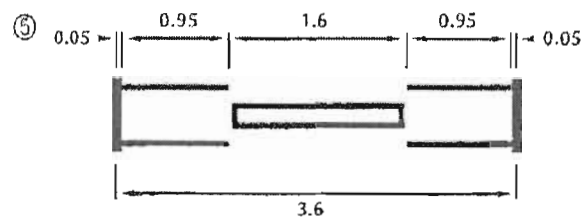
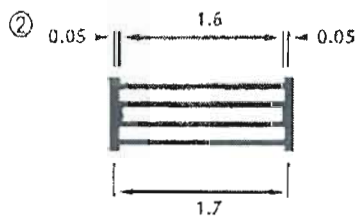
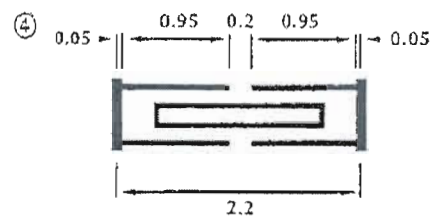
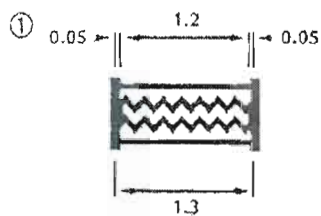
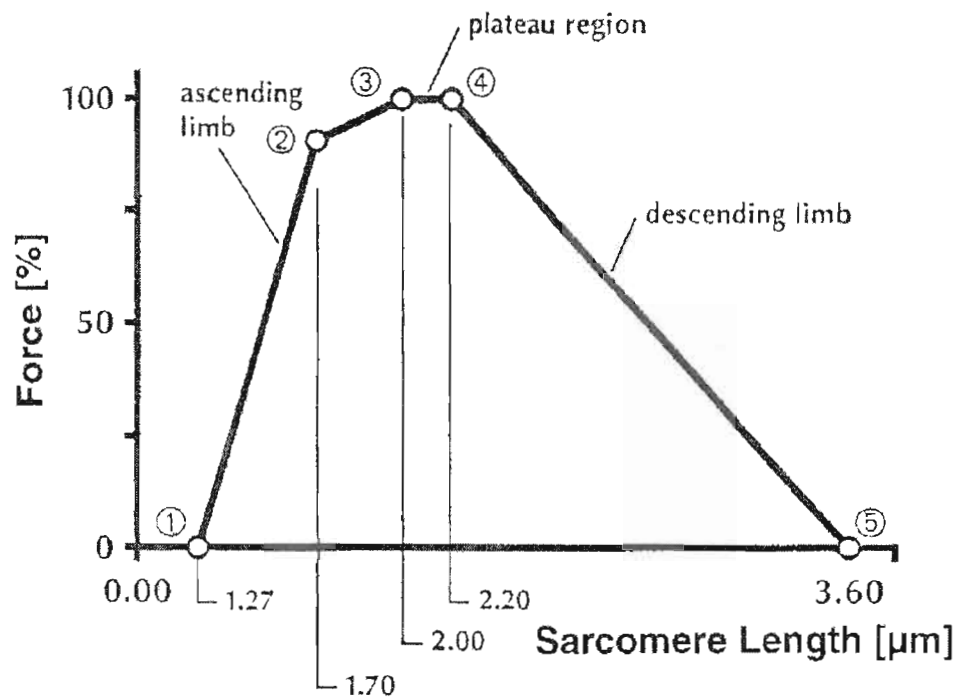
La revue de Gandevia, 2001, nous informe que la force maximale volontaire n'est pas la vraie force maximale. En effet, il y a présence de fatigue centrale, donc la fatigue musculaire humaine n'est pas simplement dans le muscle (Gandevia, 2001). Souvent les études utilise comme idée reçue ou comme prémisse que la force est simplement musculaire ou que l'effet

du système nerveux central est faible (Allen, Lannergren et Westerblad, 1995, Favero, 1999, Sejersted et Sjogaard, 2000). Les trois raisons pourquoi nous avons peu de détails sur la fatigue centrale sont les suivantes selon la revue Gandevia, 2001 : premièrement, il est simplement plus facile d'assumer la limite de la force musculaire sans avoir recours à des données neurale. Deuxièmement, la méthode pour recueillir les informations provenant du système nerveux central n'a pas toujours été effectué avec assez de rigueur ce qui à amener le sujet à être souvent critiquer ou ignorer. Troisièmement, même si l'on peut mesurer des changements dans le système nerveux central, il est beaucoup plus demandant de montrer que ces changements causent une baisse de force musculaire.

Gandevia 2001, conclu qu'il est largement accepté que l'entraînement augmente l'apport du système nerveux central par un plus grand recrutement des fibres musculaires. Il est évident que la force mesurée avant entraînement est sous-maximale. Toutefois, ces évidences sont basées sur les changements observés dans les électromyogrammes, la force de stimulation et l'effet de l'imagerie sur l'entraînement. Ces observations sont encore aujourd'hui difficiles à interpréter due à des limitations techniques.

#### 1.1.1 Mécanismes régissant la force musculaire

La théorie du glissement des filaments d'actine sur la myosine peut nous amener de précieux indices sur le moment où la force maximale de contraction d'un muscle quelconque est générée. Il s'agit du moment où les filaments d'actine sont en plus grand contact avec ceux de myosine. Bien qu'il soit difficile d'appliquer cette théorie lors de mouvements dynamiques, plusieurs études ont observé les effets sur la force générée en fonction de la longueur des sarcomères. Les premières études sur le sujet ont été effectuées il y a plus de 100 ans par Blix. Ces observations faites sur les grenouilles, encore aujourd'hui valides ont montré une augmentation constante de la force maximale à mesure que la grandeur des sarcomères s'allonge jusqu'à l'atteinte d'un plateau. Par la suite, il y a baisse constante de force (voir figure 1.12)



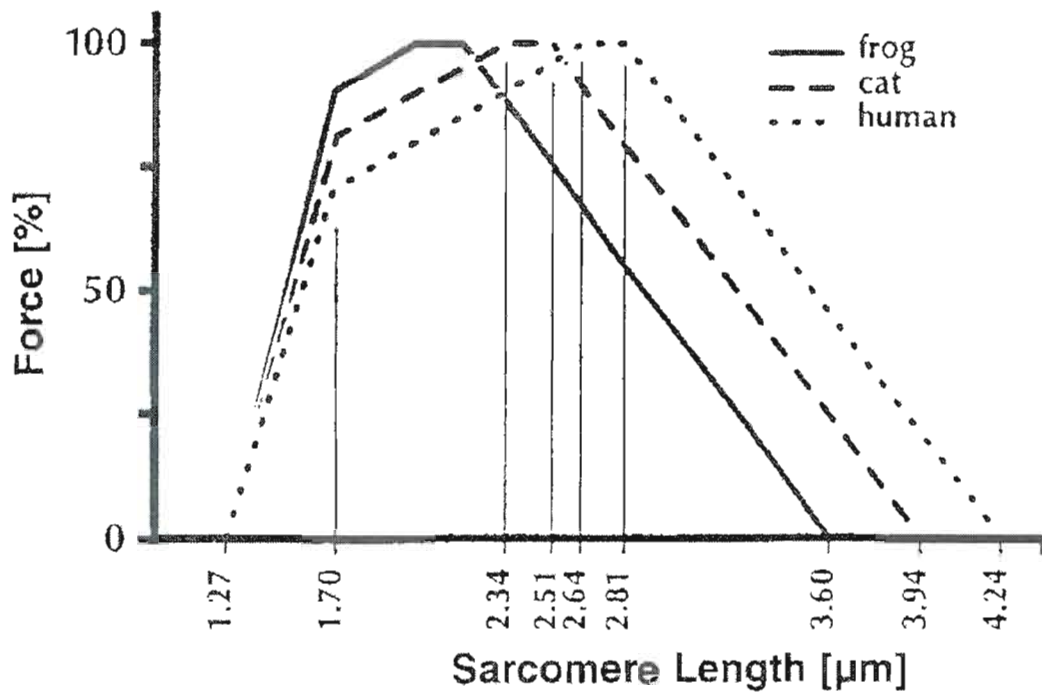


Figure 1.6- Relation longueur du muscle / force chez la grenouille décrite pour la première fois par Gordon et al., (en haut page précédente). Au bas, une vue schématique des sarcomères lors des différentes force générée selon la courbe. Sur cette page, la même courbe longueur des sarcomères / force, chez la grenouille, le chat et l'humain (Rassier, MacIntosh et Herzog, 1999).

Il est démontré que le moment de force à un certain angle articulaire dépend du bras de levier et de la longueur des sarcomères. C'est pourquoi, comme un angle donné influence la longueur des sarcomères, l'angle et le bras de levier doivent tous deux être constants lors d'une prise de mesure de la force. (Rassier, MacIntosh et Herzog, 1999). Donc, dans le présent projet un des objectifs sera de constater si le sujet est en mesure de générer une plus grande force en conservant la même amplitude de mouvement après les 8 semaines.

### 1.1.2 Mécanismes régissant la réparation et l'entraînement musculaire

Les protéines musculaires sont en constant cycle dégradation-construction. Si la somme de construction protéique est supérieure à la somme de protéines dégradées, il y a hypertrophie, si c'est l'inverse, il y a atrophie musculaire (Goldspink, 1991). Les cellules principalement responsables de la réparation musculaire se nomment cellules satellites. Elles ont été identifiées pour la première fois en 1961 par Mauro. Elles sont situées entre la membrane basale et le sarcolemme d'une fibre musculaire mature (figure 1.13) (Wagers et Conboy, 2005, Wozniak et al., 2005).

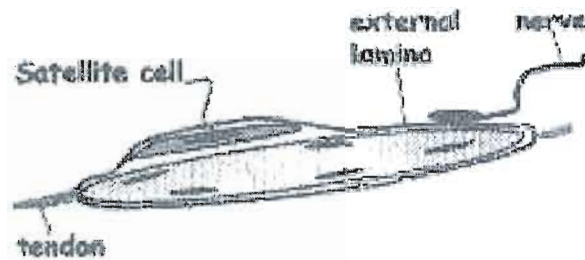


Figure 1.7- Cellule satellite (Wozniak et al., 2005)

L'activation des cellules satellite peut être induite par plusieurs facteurs telle qu'une contraction stressante, une augmentation de la concentration de calcium sarcoplasmique, une demande énergétique, la concentration d'oxygène (hypoxie), la température ou des dommages causés à la cellule musculaire (Rennie, 2004). Une fois activée, ces cellules satellites vont proliférer puis se fusionner avec des fibres musculaires endommagées déjà existantes (figure 1.14) (Volonte, Liu et Galbiati, 2004).



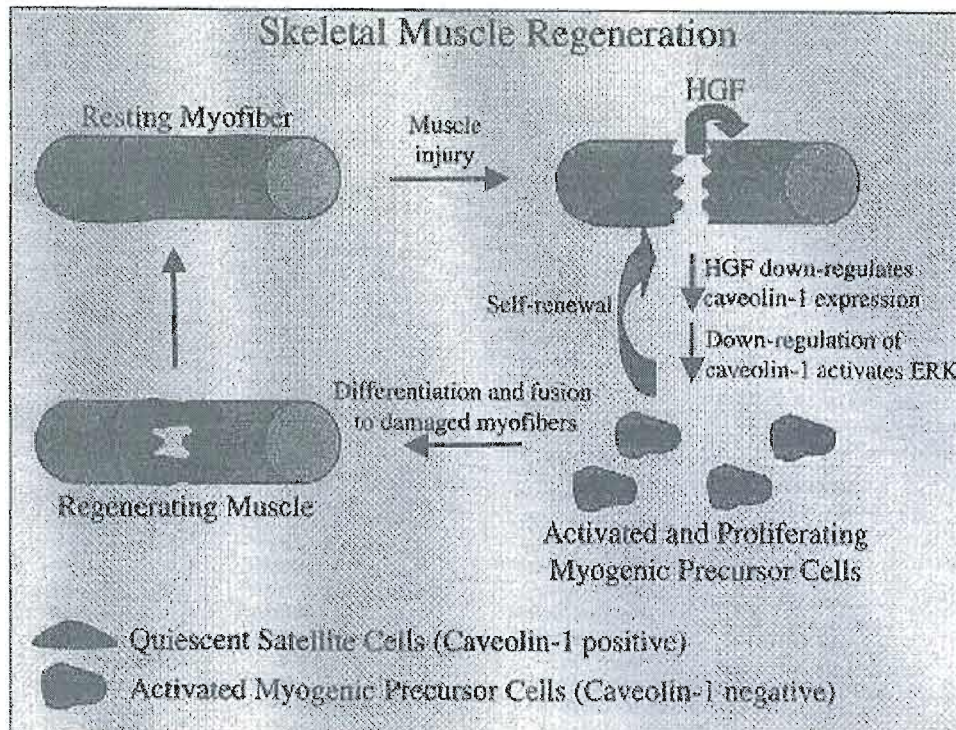


Figure 1.8- Cycle des cellules satellites (Volonte, Liu et Galbiati, 2004)

Parmi les facteurs amenant l'activation des cellules satellites, les plus connus sont l'hormone de croissance (HGF, voir Fig. 1.8), le monoxyde d'azote (NO), l'étirement et le stress physiologique induit par l'exercice (Wozniac et al., 2005). Bien que la tension musculaire induite lors de la croissance amène une hypertrophie importante (Vandeburgh,, 1987), nous allons nous concentrer sur l'hypertrophie due à l'exercice. L'activité musculaire est un des déterminants fondamentaux de la masse musculaire (Rennie, 2004). Chez l'humain, un entraînement avec charges lourdes est la meilleure façon de provoquer l'hypertrophie (Antonio et Gonyea, 1993, Lowe et Alway, 2002). Cette hypertrophie est surtout due à l'hypertrophie des fibres de type II (Antonio et Gonyea, 1993). L'hypertrophie musculaire due à l'imposition d'une surcharge demande l'orchestration de multiples signaux simultanément (Rennie, 2004). Malgré tout, plusieurs aspects concernant le déclenchement de l'activation des cellules satellites sont encore incompris (baisse pH, déplétion des réserves de glycogène, déplétion des réserves d'ATP).

Il est démontré que la capacité de prolifération des cellules satellites est réduite avec l'âge ce qui pourrait expliquer l'atrophie et la faible régénération présente chez les aînés (Rennie, 2004, Wozniac, 2005). Dans sa revue sur les causes de dysfonction musculaire chez les aînés, Dengens, 2007, explique la perte progressive de motoneurones provoque graduellement la dégénérescence de fibres musculaires amenant ainsi une atrophie musculaire. Bien que plusieurs fibres soient alors réinnervées par d'autres motoneurones, ce processus est insuffisant pour compenser les effets de la dénervation (Degens, 2007). On note souvent la perte des fibres de type II et le gain de fibre de type I avec l'âge (Degens, 2007). Également, le fait d'être moins actif amène une atrophie musculaire avec l'âge. Cependant, l'inactivité physique cause un changement de fibre lente à rapide (type I à type II) alors qu'en vieillissant, c'est l'inverse qui se produit (Degens, 2007). Même des athlètes aînés ont moins de masse musculaire si on compare à des jeunes «contrôles» (Degens, 2007). Ces faits montrent qu'il y a d'autres mécanismes que l'inactivité physique qui interviennent pour causer l'atrophie musculaire chez les personnes âgées. Certaines études ont observé qu'une fibre musculaire d'une souris âgée placée dans le milieu extracellulaire d'une souris jeune favorise sa croissance et sa régénération (Degens, 2007). À l'inverse, une fibre musculaire d'une souris jeune placée dans le milieu extracellulaire d'une souris vieille atténue sa capacité régénérative (Degens, 2007). Ces faits montrent clairement que l'environnement cellulaire joue un rôle majeur dans la croissance musculaire et que des changements sont présents en vieillissant (Degens 2007).

Aussi les fibres musculaires sont hautement adaptatives et qu'une atrophie accompagne l'inactivité, tandis que l'entraînement en force, à l'inverse, provoque l'hypertrophie (Degens, 2007). Même à l'âge avancé, l'entraînement en résistance augmente la masse musculaire et la force (Dengens, 2007).

Bien que la nutrition soit un facteur important dans le maintien d'une bonne santé, il est possible pour un muscle régulièrement actif de maximiser sa masse malgré un faible apport en protéine (Rennie, 2004). Pour qu'il y ait hypertrophie, il est essentiel que l'entraînement comprennent des contractions excentrique (Antonio et Gonyea, 1993, Cometti, 2005). Un travail effectué en excentrique entraîne des lésions au niveau de la strie Z dans le muscle et

ces lésions déclencheront l'activation des cellules satellites (Cometti, 2005). Il est largement documenté que des séries de 6 répétitions ou moins avec des charges près du maximum développera la force alors que des séries de 6 à 12 répétitions avec des charges à 70-75% du maximum développera plutôt l'hypertrophie musculaire (Baechle et al., 2000, Cometti, 1994, Cometti 2005).

Bien que le sujet soit encore discuté de nos jours (Craig, 2001, Incledon et Antonio, 2000) il semblerait très probable que le gain de masse musculaire serait dû non seulement par une augmentation du volume de la fibre musculaire (hypertrophie) mais également à une augmentation du nombre de fibre musculaire (hyperplasie). Ce phénomène est bien démontré chez les animaux que ce soit suite à un entraînement avec surcharge (Antonio et Gonyea, 1993) ou encore lors d'étirements passifs de longue durée (Goldspink, 1978).

Cependant, les évidences observées chez l'homme ne sont qu'indirectes. En effet, les tenants de la théorie contre l'hyperplasie affirment avec raison qu'aucune étude n'a pu isoler une fibre musculaire humaine, la soumettre à un entraînement et observer son dédoublement. Par contre, plusieurs preuves indirectes paraissent tous aller dans le sens de l'hyperplasie : il a été observé par biopsie musculaire que la grosseur des fibres musculaires de certains culturistes est semblable à celle de sujets non entraînés. Pour obtenir une si grande différence au niveau de la masse musculaire, il faut bien qu'un autre système que celui de l'hypertrophie entre en ligne de compte. Également, Antonio et Gonyea, 1993, ont fait le compte des fibres musculaire du *M. peronaeus brevis* et ont constaté que le côté ayant subi un entraînement avec charge avait un nombre de fibre supérieur au côté le moins sollicité. Il serait alors probable que le gain de volume observé chez nos sujets ne soit pas uniquement dû aux phénomènes d'hypertrophie musculaire mais également due à l'hyperplasie.

Une étude de Kadi et al., 2004 ont entraîné en musculation 15 sujets 3 fois par semaine durant 3 mois. L'entraînement consistait en 4-5 séries de 6-12 répétitions de 4 différents exercices pour les membres inférieurs (Squat, presse inclinée, extension et flexion du genou). Le but de l'expérience était de vérifier l'état des cellules satellites et des fibres musculaire avant, pendant et après entraînement. Une hausse de 19% des cellules satellites fut observée

après 30 jours, 31% après 90 jours. Le nombre de cellules satellite est demeuré élevé jusqu'à 60 jours après la fin de l'entraînement. Au niveau des fibres musculaires, leurs nombres n'ont pas augmenté avant et après l'entraînement mais la distance entre chaque noyau de chaque fibre était plus grande tout de suite après les 3 mois d'entraînement due à l'hypertrophie musculaire. La taille des fibres fut de nouveau la même 90 jours après la fin de l'entraînement montrant la très grande plasticité de cellules satellites en fonction des stimuli reçus.

### 1.1.3 Principes d'entraînement

Il est largement documenté que l'entraînement se produit de façon spécifique, c'est-à-dire que des exercices prolongés en endurance augmenteront la capacité oxydative du muscle, les enzymes aérobiques du muscle, l'augmentation de la densité des mitochondries, etc, alors qu'un entraînement en force avec de hautes charges provoquera l'hypertrophie responsable du gain de force du muscle entraîné (Hakkinen et al. 2002). L'étude de Hakkinen et al., 2002 a observé qu'un entraînement en endurance jumelé à un entraînement en force ne va pas nécessairement nuire aux gains de force si le volume d'entraînement total ne dépasse pas la capacité du sujet. Donc le gain de force d'un groupe de sujet s'entraînant en force 2 fois par semaine durant 21 semaines fut similaire à un groupe s'entraînant 2 fois par semaine en force et 2 fois par semaine en endurance durant 21 semaines. Dans les deux cas l'entraînement en force consistait en 3-5 séries de 8-10 répétitions en augmentant graduellement la charge (50% à 70% de la charge maximale possible en 1 répétition). L'entraînement en endurance était sur un ergocycle et consistait 1 fois par semaine en des intervalles à différents niveaux des seuils aérobique et anaérobique et 1 fois par semaine en travail long sous le seuil aérobique. Les temps de travail furent augmentés à mesure que les semaines d'entraînement avançaient (Hakkinen et al., 2002).

Concernant un entraînement traditionnel, la méta-analyse de Rhea et al., 2003, suggère une fréquence 3 fois par semaine pour les sujets sédentaires et 2 fois par semaine (par groupe musculaire) pour les sujets entraînés pour obtenir des résultats optimaux. Aagaard et al., 1994, ont obtenu des gains en force du quadriceps à raison de 3 entraînements par semaine durant

12 semaines. L'entraînement des deux groupes était soit de 4 séries de 8 répétitions maximales (à vitesse lente, car charge plus lourde) ou soit 4 séries de 16 répétitions maximales (à vitesse rapide, car charge plus légère). Dans les deux cas un gain de force fut observé. Dans le cas de l'emploi de charge lourde, le gain de force fut observé lors de mouvement d'extension à des vitesses lentes et rapides alors que dans le cas de l'emploi de charges plus légères, le gain de force fut seulement observé à la vitesse de l'entraînement – vitesse rapide- (Aagaard et al., 1994).

Un entraînement avec des exercices progressifs en résistance est l'un des moyens les plus efficaces connu à ce jour pour obtenir une hypertrophie musculaire (Lowe et Alway, 2002).

## 1.2 Éléments de connaissance en électrostimulation

Le but de cette section est de faire la revue des différents paramètres appliqués lors d'un entraînement en électrostimulation et des différents entraînements effectués dans le passé ayant apporté une augmentation de la force de contraction et du volume musculaire.

Collin, 2007 cite que la résultante des contractions est crue comme provenant d'un mécanisme périphérique, où les unités motrices sont recrutées par la dépolarisation de motoneurone sous les électrodes de stimulation. Le recrutement des motoneurones active les unités motrices d'une façon non physiologique. Les fibres musculaires ne sont pas directement stimulées à cause de leur plus grande résistance (dix fois plus grande) de stimulation (Collin, 2007).

### 1.2.1 Caractéristiques du courant employé en électrostimulation

Le courant biphasique se définit comme un courant variable où la polarité du courant s'inverse en permanence. Les électrodes passent donc alternativement d'une polarité positive à négative dans un temps donné. (Decherchi et al., 2003, Portmann, 1991).

Plusieurs types d'ondes peuvent être utilisés en électrostimulation. Les trois types d'onde de la figure 1.9 sont caractérisés par un équilibre égalant un 0 net dans la direction du courant. La portion positive de l'onde est donc égale à sa portion négative. Cela réduit une migration d'ions vers les tissus cutanés où sont apposées les électrodes. L'alcalose et l'acidose de la peau sont ainsi prévenues ainsi que les différentes réactions de la peau due une concentration polarisée d'ions (Mannheimer et Lampe, 1984). Due à cette inversion constante de polarité, l'utilisation du courant biphasique amène moins de risque de brûlures cutanée (Decherchi et al. 2002, Mannheimer et Lampe, 1984). Les 3 types d'ondes de la figure 1.9 sont celles généralement utilisées en électrostimulation.

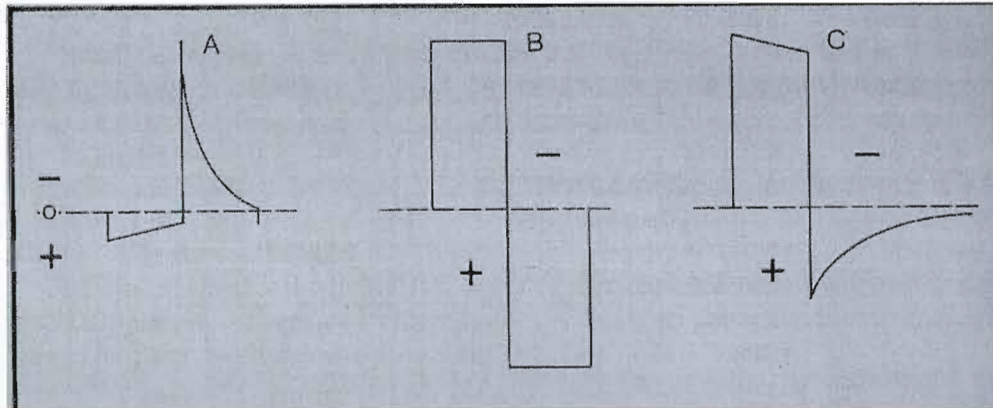


Figure 1.9- Ondes biphasiques balancées avec un 0 net dans la direction du courant : A «Spike», B Carrée symétrique, C Carré asymétrique (Mannheimer et Lampe, 1984)

Le front de montée et de descente est une notion surtout utilisée lors de l'emploi d'une onde carrée (rectangulaire). Elle est définie par le temps nécessaire au courant pour se rendre à son point le plus haut (front de montée) ou l'inverse (front de descente).

### 1.2.2 Effet de la durée de la stimulation sur la force de contraction musculaire

Lors de l'emploi d'un courant biphasique, la durée d'une impulsion est le temps pendant lequel le courant se dirige dans la même direction. La durée du cycle influence grandement la contraction musculaire. Decherchi et al., 2002 cite: «Lorsqu'une onde a une durée de phase

longue, les faibles augmentations d'amplitude entraîne une forte réaction motrice ou sensitive» également observé dans la revue de Striata et al., 1994 . Ces concepts sont connus sous le nom de chronaxie et de rhéobase (voir Fig 1.10). La rhéobase représente l'intensité minimale requise pour exciter le nerf. La chronaxie représente le temps minimum nécessaire pour exciter le nerf en employant le double de l'intensité nécessaire pendant la rhéobase (Dumoulin et De Bisschop, 1984). Des tests faits avec des muscles dénervés ont montré que la phase doit être beaucoup plus longue pour stimuler la fibre musculaire elle-même en comparaison avec le nerf moteur. Avec le muscle dénervé, la chronaxie survient à 10 ms, avec la fibre nerveuse, la chronaxie survient à 0,03 millisecondes (Benton et al., 1980). Mercier, 1992 s'accorde avec ces faits en donnant une chronaxie de l'ordre de 0,3 ms pour les fibres nerveuses myélinisées et 0,5 ms pour les fibres non myélinisées.

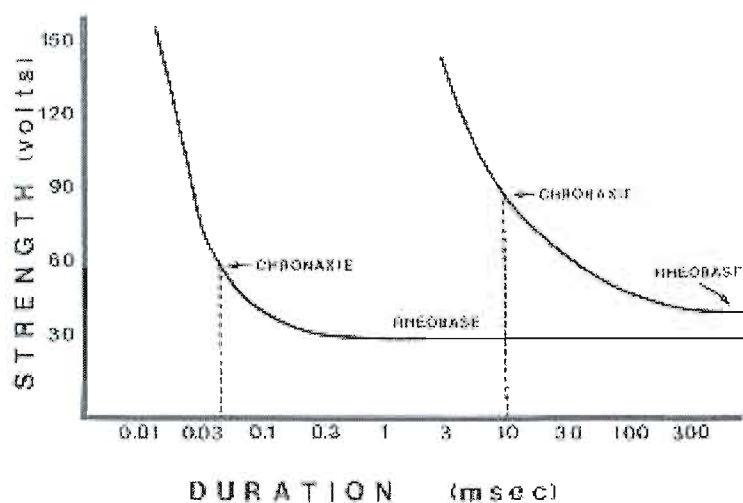


Figure 1.10- Courbe intensité-durée pour stimuler le nerf (courbe de gauche) ou une fibre musculaire (courbe de droite). L'intensité de stimulation nécessaire pour obtenir une forte contraction diminue à mesure que la durée de la stimulation augmente jusqu'à l'arrivée d'un seuil de stimulation minimal (rhéobase). La stimulation du nerf survient beaucoup plus rapidement (0,03 ms) que la stimulation de la fibre musculaire (10 ms) (Benton et al., 1980).

À partir d'une certaine valeur de durée d'impulsion, toutes les fibres potentiellement excitables sont recrutées et la force de contraction produite ne pourra augmenter davantage en modifiant ce paramètre de stimulation (Maitre 2000). En électrostimulation, la durée des impulsions est généralement entre 200 et 1000  $\mu\text{s}$ . (Duchateau, 1992). Portmann, 1991 cite dans sa revue qu'entre 100 et 400  $\mu\text{s}$  sont nécessaires pour activer les fibres nerveuses.

### 1.2.3 Impédance

L'impédance représente l'ensemble des facteurs contribuant à s'opposer au passage du courant lors de l'électrostimulation. Parmi ces facteurs, notons les conditions de la peau, la température de la peau, le type d'électrodes utilisées, le pourcentage d'hydratation de la peau, le pourcentage de masse adipeuse, les changements hormonaux et la longueur du circuit résistif (Portmann, 1991, Lawani, 1993, Malissard 1992). La conduction du courant peut être améliorée par différents moyens tels que nettoyer la peau avant d'y apposer les électrodes et utiliser un gel ou de l'eau selon le type d'électrode. Ces moyens vont réduire l'impédance électrode-peau (Portmann, 1991). Afin d'optimiser les paramètres de stimulation, l'idéal est donc de réduire au maximum l'impédance et ainsi l'énergie électrique dissipée. En électrostimulation, l'énergie électrique dissipée atteint un minimum pour des durées d'impulsions comprises entre 200 et 600  $\mu\text{s}$  (Malissard, 1992).

### 1.2.4 Placement des électrodes

La grosseur des électrodes utilisées influence plusieurs paramètres liés à la contraction musculaire. Il est généralement admis que la grosseur des électrodes sera choisie proportionnellement à la grosseur du muscle à stimuler (Maitre 2000). Plus une électrode possède une grande surface de contact, moins grande sera son impédance (Moreno-Aranda et Seireg, 1981). Le fait d'utiliser de grandes électrodes amène une plus grande dispersion du courant et rend la stimulation beaucoup plus agréable pour le sujet. Cependant, l'utilisation de grandes électrodes génère une stimulation beaucoup moins spécifique et peut même entraîner la contraction des muscles voisins (Lawani, 1993). Au contraire, de petites



électrodes amène une contraction très spécifique mais la grande densité de courant peut engendrer des sensations désagréables chez le sujet.

Deux techniques peuvent être employées lors de l'électrostimulation. La première est la technique monopolaire. Cette technique emploie une grande électrode de dispersion placée sur une région autre que celle stimulée et deux électrodes de stimulation, plus petites, placées sur le muscle. (Maitre 2000, Portmann, 1991). Elle peut servir dans les traitements de douleurs diverses en stimulant le point moteur de muscle individuel, mais est très peu efficace si l'entraînement vise la prévention de l'atrophie ou le renforcement musculaire (Portmann, 1991).

La deuxième est la technique bipolaire. Cette technique utilise des électrodes de mêmes tailles, une située sur la partie proximale et l'autre sur la partie distale du muscle à exciter (Maitre 2000). Cette technique est la plus répandue pour les entraînements en renforcement musculaire et s'est avérée efficace chez plusieurs (Portmann, 1991).

Il est bien connu qu'il existe en électrostimulation des points moteurs (voir Fig. 1.11), endroits dans le muscle où le nerf moteur est à son épanouissement musculaire (Maitre 2000, Dumoulin et De Bisschop, 1984). Une électrode apposée sur un point moteur va donc générer une contraction plus forte en stimulant plus d'unités motrices en ce point donné comparativement à un autre endroit sur le muscle. (Maitre 2000).

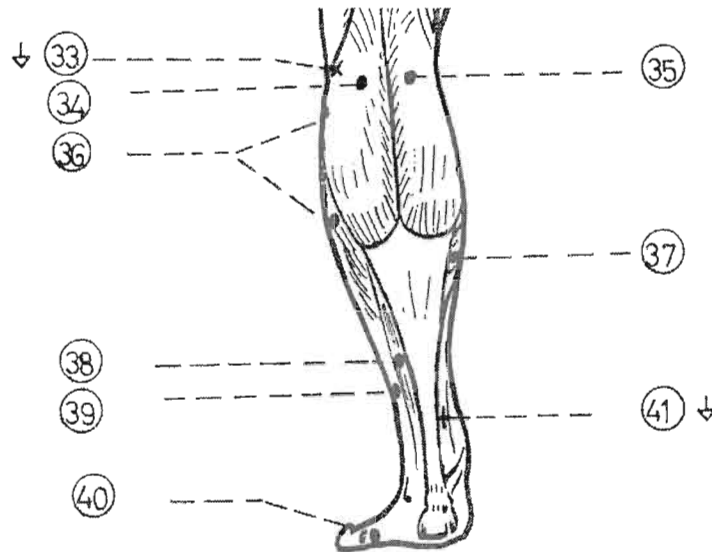


Figure 1.11- Point moteur des jumeaux et du soléaire no. 34 à 37 (Dumoulin et De Bisschop, 1984)

Il est également possible de contrôler la pénétration du champ électrique en modifiant la distance entre chacune des électrodes (Duchateau, 1992, Portmann, 1991). Ainsi, plus les électrodes sont éloignées entre elles et plus la stimulation électrique est profonde.

#### 1.2.5 Effet de la fréquence de stimulation sur la force de contraction musculaire

La fréquence se définit comme un nombre d'impulsions effectuées par une onde à l'intérieur d'un temps donné (voir Fig. 1.12). La fréquence est mesurée en Hertz (ou pulsation par secondes). Un train d'impulsion se définit comme un nombre d'ondes émises à une fréquence donnée. Normalement, suite à l'envoi d'un train d'impulsion, une période de repos est accordé au muscle stimulé. La plupart du temps, un entraînement en électrostimulation est composé de plusieurs trains d'impulsions. (Portmann, 1991)

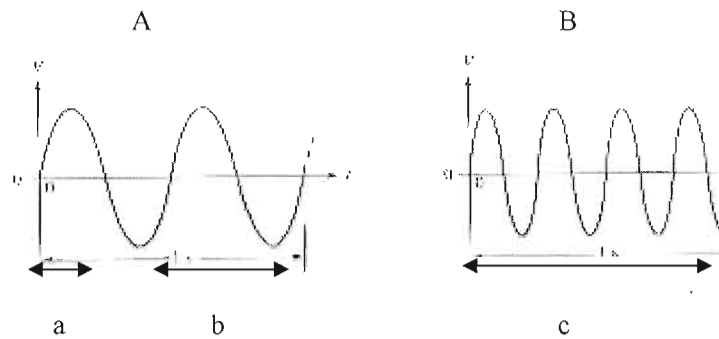


Figure 1.12- Courant biphasique: A possède une fréquence plus basse que B. a = durée de la phase, b = durée de l'impulsion, c = durée du train d'impulsion (Portmann, 1991)

Lors de l'emploi d'un courant à une intensité donnée, l'augmentation de la fréquence de stimulation va graduellement provoquer une augmentation de la force de contraction jusqu'à la tétanie musculaire. Cette augmentation de la force de contraction est due à la sommation des contractions des fibres musculaires induite par chacune des stimulations. Avant l'atteinte de la tétanie, le temps de repos entre les stimulations est suffisamment long pour permettre au muscle d'avoir un moment où aucune fibre musculaire n'est en contraction, il y a donc baisse de la force. Lors de l'atteinte de la tétanie, le temps de repos est trop court pour permettre aux fibres dans le muscle de se reposer avant de se contracter à nouveau ce qui amène l'augmentation constante de la force de contraction musculaire jusqu'à un plateau représentant la force maximale de contraction.

Lors de l'atteinte de ce plateau, induit par une contraction téтанisante, il est intéressant de constater que l'utilisation d'une fréquence plus élevée n'augmentera pas davantage la force de contraction. Au contraire, la force de contraction va décliner. (Bennie et al. 2002). Nous attribuons cette baisse de force à la fatigue musculaire qui s'installe rapidement (Portmann, 1991).

Comme les fibres rapides de type II ont un plus gros diamètre, ce sont les fibres rapides qui sont dépolarisé en premier lieu lors de l'électrostimulation. Par la suite, il y a

dépolarisation des fibres intermédiaires, puis dépolarisation des fibres lente de type I (De Bisschop, Dumoulin et Aaron, 1989).

Le choix des fréquences utilisées lors d'un entraînement par électrostimulation doit donc être établi en fonction du type de fibres dont est principalement composé le muscle. En général, la force maximale est obtenue chez l'homme pour des fréquences de stimulation comprise entre 50 et 120 Hz (Duchateau 1992, Fredon, 1994).

#### 1.2.6 Effet de l'intensité sur la force de contraction musculaire

Le changement dans l'intensité du courant ne changera pas la force de contraction d'une fibre musculaire déjà adéquatement stimulée. Comme nous l'avons dit plus haut, selon la loi du tout ou rien, la fibre nerveuse va envoyer un potentiel d'action jusqu'à la fibre musculaire dès que le seuil d'excitation est atteint. Une stimulation plus grande n'amènera pas une contraction plus grande pour cette fibre musculaire en particulier. Cependant, l'augmentation de l'intensité du courant augmente la pénétration du champ électrique à travers les tissus, c'est pourquoi il est commun de constater une augmentation du recrutement des fibres musculaires en fonction de l'intensité du courant (Decherchi et al. 2002, De Bisshop, Dumoulin et Aaron, 1989). Lorsque le muscle est déjà entièrement recruté à une intensité donnée, augmenter l'intensité du courant n'augmentera pas davantage la force de contraction générée par le muscle (Latasch, 1994). Selkowitz, 1989, nous informe qu'il n'y a pas de relation solide entre le courant employé et la force de contraction générée par le muscle. Autrement dit, même si théoriquement, un courant plus fort amène une contraction plus forte, la relation entre l'augmentation du courant et la force de contraction n'est pas linéaire et l'emploi d'un courant beaucoup plus fort peu amener très peu de différence au niveau de la contraction musculaire en plus d'être inconfortable pour le sujet.

#### 1.2.7 Effets de différents entraînements en électrostimulation

Plusieurs travaux ont été effectués dans le domaine de l'électrostimulation. Le but de cette section est de citer quelques uns des plus actuels concernant le gain en force et en

volume musculaire étant donné qu'il s'agit des deux aspects observés dans ce projet de recherche. Selkowitz, 1989, distingue deux types d'entraînements en électrostimulation; l'entraînement en force et l'entraînement en endurance. L'entraînement en force utilise des fréquences plus hautes (2 500 Hz, la plupart du temps modulée à 50 Hz) avec des durées totales de stimulations plus courtes (10 stimulations de 10 secondes au total) et un temps de repos plus long entre les stimulations (50 secondes). L'entraînement de type endurance utilise des fréquences plus basses (50 à 200 Hz) avec des temps de repos et de contraction très similaires (de 4 à 15 secondes pour l'un et l'autre) pour une durée variant entre 6 à 15 minutes par session d'entraînement. L'auteur explique que la plupart des discussions incluses dans sa revue de littérature sont basées sur des études utilisant des fréquences de stimulation de moins de 500 Hz.

#### 1.2.7.1 Gain en force

Valli et al. en 2002, ont entraîné les quadriceps de 13 sujets sédentaires durant 11 jours à raison de 30 minutes par jour à une fréquence de 60 à 90 Hz durant 7 s. suivit d'un «repos» de 15 s. en stimulant le muscle à une fréquence de 20 Hz. Le courant utilisé était le maximum toléré par le sujet. La force de contraction maximale des quadriceps (muscles stimulés) a augmenté après les 11 jours.

Paillard et al., en 2004 ont comparé les effets d'un programme de 6 semaines en électrostimulation du quadriceps pour vérifier le gain de force et le gain de masse musculaire après entraînement. Utilisant une fréquence de 20 Hz et une onde carrée biphasique, les stimulations étant d'une durée de 350  $\mu$ s durant 15 minutes. Les auteurs ont constaté un gain en force isométrique et dynamique après les 6 semaines d'entraînement (les résultats du gain de masse seront discutés à la section suivante). Cette conclusion est en accord avec celle de Selkowitz, 1989 qui informe qu'il est commun de constater un gain de force isométrique du quadriceps à certaines positions lors d'un entraînement par électrostimulation en isométrique. D'autre part, le même auteur nous informe que l'augmentation de la force de contraction isométrique lors de l'électrostimulation employée seule est directement proportionnelle à la force de contraction moyenne générée lors de l'entraînement par électrostimulation. Cometti,

1994 affirme «on ne peut obtenir de progrès en électrostimulation si la force induite est inférieure à 60% de la force maximale volontaire».

Une étude effectuée sur le biceps brachial à une fréquence de 80 Hz, utilisant une onde carrée d'une durée de 240 us. a été effectuée par Colson, Martin et Van Hoecke en 2000. L'entraînement consistait en 5 séries de contractions isométrique d'une durée de 6 s. générant 60 à 70% de la force de contraction maximale en maintenant le coude à un angle de 90 degrés. L'étude a observé un gain en force isométrique, concentrique et excentrique lors de la flexion du coude. L'entraînement a été effectué avec 17 sujets séparés en un groupe expérimental et un groupe témoin et avait lieu 3 fois par semaines durant 7 semaines. À la fin de la période d'entraînement, l'activité myoélectrique du muscle agoniste avait augmenté lors du mouvement de flexion du coude alors que celle du muscle antagoniste était restée la même, expliquant que le gain de force était surtout dû à une adaptation du système nerveux central.

Une étude effectuée sur le triceps sural par Martin et al., 1994 a montré un gain en force isométrique et concentrique. L'étude comportait 12 sujets séparés en deux groupes dont les sujets d'un des groupes étaient stimulés avec des stimulations d'une durée de 200 us à une fréquence de 70 Hz. Le temps de contraction était de 5 s. suivi de 15 s. de repos pendant 10 minutes. L'entraînement a eu lieu 3 fois par semaine durant 4 semaines. Cependant, après mesure du diamètre des myofibrilles du muscle, aucun changement n'a eu lieu après les 4 semaines. Ces résultats laissent encore supposer que les adaptations ont été effectuées par le système nerveux et non pas par le muscle lui-même.

Une étude s'est intéressée sur la stimulation électrique des fléchisseurs plantaires. 14 sujets ont pris part à l'expérimentation, 6 ont servi de groupe contrôle et 8 ont subi un entraînement en électrostimulation de 4 semaines à raison de 4 fois par semaine. L'entraînement utilisait une onde rectangulaire d'une durée de 400 us et une fréquence de 75 Hz. Les contractions étaient d'une durée de 5 s suivi de 20 s de repos durant 18 minutes. Le courant était toujours le maximum toléré par le sujet et variait de 30 à 90 mA. La force de contraction induite par l'électrostimulation était entre 50 et 70% de la force maximale

obtenue avant l'entraînement. Les résultats ont montré un gain lors de mouvement isométrique et excentrique. Les observations neuromusculaires furent les mêmes que ceux décrites dans l'étude précédente (Maffiuletti, Pensini et Martin, 2002).

Maffiuletti et al., 2000 ont observé les effets d'un entraînement en électrostimulation sur la force des extenseurs du genou et sur le saut vertical sur 20 joueurs de la ligue de basket-ball de la fédération française. L'entraînement était à raison de 3 fois par semaine durant 4 semaines en plus des pratiques et match régulier de basket-ball. Une onde rectangulaire d'une durée de 400 us et d'une fréquence de 100 Hz fut utilisée. Les contractions étaient d'une durée de 3 secondes et étaient suivies de 17 secondes de repos. Comme un entraînement était de 48 contractions, la durée totale d'une séance était donc de 16 minutes par groupe musculaire. Un courant variant entre 60 et 100 mA fut utilisé, générant 80% de leur force de contraction maximale. Il est important de spécifier que cette étude fut effectuée avec des sportifs sans problèmes de genoux préalables. Les résultats ont démontré un gain de force à des vitesses entre 180 et 360 degré par seconde lors de l'extension du genou et un gain de 14% sur le saut vertical. Cependant, aucune amélioration de la force n'a été observée à des vitesses plus lentes de 120 et de 60 degrés par secondes dans cette étude. Dans sa revue de littérature, Selkowitz, 1989 nous informe que des gains en vitesse peuvent être observés également à des vitesses de 30, 60, 90 et 120 degrés lors des entraînements en électrostimulation de type endurance.

Une étude avec des nageurs (7 entraînés par électrostimulation au niveau des muscles du grand dorsal et 7 témoins) a utilisé les paramètres de stimulation suivants : durée 3 semaines à raison de 3 fois par semaine 12 minutes chaque fois. Fréquence de 80 Hz durant 300 us pour 6 secondes de contraction et 20 secondes de repos. Les contractions étaient en moyenne équivalentes à 60 % de la force de contraction maximale du grand dorsal. Les nageurs entraînés ont eu une augmentation de la force de leur grand dorsal et de leur vitesse d'exécution du 50 libre, tandis que les sujets du groupe témoins n'ont pas eu d'amélioration (Pichon et al., 1995). Un protocole similaire a vu l'amélioration des performances au niveau de la force et de la vitesse de patinage de joueurs de hockey (Brocherie et al., 2005).

### 1.2.7.2 Gain en volume

Bien que le gain de force par l'électrostimulation soit largement documenté, le gain en volume est moins évident. Selkowitz (1989), affirme qu'aucune association entre le gain de force et un changement au niveau de la physiologie du muscle n'a été établit jusqu'à maintenant. Portmann, 1991, nous informe que les études divergent et attribuent le manque de résultat en gain de volume au fait que la plupart des études ne sont que d'une durée de 15 à 24 séances, ce qui laisse peu de temps pour permettre au muscle d'hypertrophier.

Paillard et al., 2004 n'ont obtenu aucun gain en volume, concluant que la durée de 6 semaines d'entraînement était trop courte pour voir une hypertrophie musculaire apparaître.

Néanmoins, Turostowski, Fayolle et Cometti lors d'une expérience sur des sauteurs en 1991 ont réussis à observer un gain de masse musculaire sur le quadriceps en 3 semaines, des résultats similaires ont été obtenus sur le biceps brachial par Gilet et Cometti en 1990 (Cometti, 1994).

Cependant, aucun gain de masse sur le triceps sural n'a été observé avec le même protocole sur des coureurs de demi-fond par Assadi et Cometti en 1991 ou sur des sujets sportifs par Martin et Cometti en 1991. L'auteur explique ceci parce que les sujets continuaient leur entraînement en endurance parallèlement à l'électrostimulation ce qui a eu pour effet de limiter les effets de l'hypertrophie.

La revue de Selkowitz, 1989 nous informe que si l'intensité et la durée de contraction du muscle sont adéquates, peu importe la façon dont elle est induite va amener le déclenchement du mécanisme d'adaptation cellulaire c'est-à-dire l'hypertrophie musculaire.



### 1.2.8 Électrostimulation d'un muscle atrophié

Bien que ce ne soit pas le but principal de notre projet de recherche, plusieurs travaux en électrostimulation ont été effectués sur des muscles dénervés. Voici un résumé des éléments connus sur ce sujet.

Decherchi et al. (2003), expliquent que suite à une lésion de la moelle épinière, des modifications importantes peuvent être amenées à la structure musculaire de l'être humain. Parmi les phénomènes observables, un des plus flagrants est la diminution de la masse musculaire résultant de la diminution du diamètre des fibres. On observe aussi une chute de force maximale qui est proportionnelle à la baisse de diamètre total des fibres musculaires. Ces auteurs expliquent finalement que l'électrostimulation contribue à réduire l'atrophie d'un muscle, ce qui est en accord avec la revue faite par Portmann, 1991.

Decherchi et al., 2002 expliquent que l'électrostimulation pourrait aider le muscle à générer une force de contraction si la réinnervation se produit. La revue de littérature de Eberstein et Eberstein, 1996 affirme que l'activité musculaire induite par électrostimulation est la meilleure façon de limiter l'atrophie d'un muscle dénervé. Ces auteurs expliquent aussi que plusieurs paramètres de stimulation sont à considérer tels que l'amplitude, la fréquence, la durée du stimulus, la durée du train d'impulsion et la durée entre les trains d'impulsions. Les auteurs ne s'entendent pas sur l'importance ou sur l'impact de chacun de ces facteurs pour avoir la meilleure stimulation possible.

Chez les animaux, il est démontré qu'un entraînement en isométrie à une fréquence de 50 Hz, 30 minutes par jour, 5 jours par semaine empêche le tibialis antérieur du lapin de subir une atrophie malgré une complète immobilisation (Quin et al., 1997).

Crameri et al., 2002 ont fait subir à 6 personnes avec lésion à la moelle épinière un entraînement par électrostimulation des fessiers, quadriceps et ischio jambier afin d'induire un mouvement cyclique sur un ergomètre. L'entraînement était à raison de 3 fois par

semaines à une fréquence de 35 Hz pendant 10 semaines. Les résultats après expérimentation ont révélé un gain des enzymes oxydatifs, en volume musculaire et densité capillaire. Il est décrit également dans la littérature que l'utilisation de l'électrostimulation chez les personnes ayant subi une atrophie musculaire suite à une sous-utilisation du muscle diminue la perception de la douleur et permet ainsi aux sujets d'avoir confiance en leur mouvement et aller au-delà de leur amplitude de mouvement ou de leur force habituelle, ce qui leur permet une réadaptation plus rapide (De Bisschop, Dumoulin et Commandré, 2001).

#### 1.2.9 Effets de jumeler un entraînement en contraction volontaire à un entraînement en électrostimulation

Pour l'entraînement des quadriceps chez des sujets sains, aucune différence n'est apparente entre un entraînement en contraction volontaire, un entraînement en électrostimulation, ou un entraînement en électrostimulation jumelé à des contractions volontaires pour le développement de la force isométrique (Selkowitz, 1989). Morth, 2002 arrive à la même conclusion.

Vanderthommen et al., 1999, ont démontré que la sollicitation métabolique était plus grande avec l'entraînement en électrostimulation comparativement à un travail équivalent en contraction volontaire.

### 1.3 Éléments de connaissance sur la rupture du tendon d'Achille

Le but de cette section est de faire une revue sur l'origine de la rupture du tendon d'Achille et de ses causes. Par la suite nous allons faire la revue des traitements offerts actuellement de ceux ayant subi une rupture du tendon d'Achille et des problèmes encore présent suite à cette lésion.

### 1.3.1 Bref historique de la rupture du tendon d'Achille

La rupture du tendon d'Achille est une blessure remontant probablement au-delà du temps des Grecs et qui prend son nom du légendaire héros qui, racontée dans l'*Illiade* d'Homère, en fut le premier à avoir historiquement subi sa rupture (Schepisis, Jones et Haas, 2002).

Cette blessure fut premièrement décrite par Ambroise Paré en 1575 et fut premièrement reporté dans la littérature en 1633 (Cetti et al., 1993). La rupture du tendon d'Achille était un phénomène peu commun auparavant jusque dans les années 1950 (Jozsa et al., 1989).

Bien que le tendon d'Achille soit le tendon le plus fort du corps humain (Järvinen et al., 2001), il est aujourd'hui l'un des plus fréquemment blessé chez l'humain (Wren et al., 2003). Cette affliction est aujourd'hui perçue à la fois comme une blessure sérieuse et commune (Cetti et al., 1993). Il est accepté que l'incidence de la rupture du tendon d'Achille a augmenté dans les dernières décennies proportionnellement à l'augmentation du temps libre et des sports récréatifs dans les pays civilisé (Järvinen et al., 2001).

Ces auteurs relatent également que 60 à 75 % du temps, ce sont des personnes actives qui subissent une rupture du tendon d'Achille. Les sports où il est commun de retrouver cette blessure sont le soccer, l'athlétisme, le badminton et le basket-ball (Järvinen et al., 2001). En général, les afflictions au tendon d'Achille surviennent chez les athlètes de sexe masculin (Alfredson et al., 1998), au minimum 4 hommes pour une femme est affecté par cette blessure (certaines études vont même jusqu'à 7 hommes pour 1 femme (Jozsa et al., 1989).

L'âge moyen de la personne subissant une complète rupture du tendon est entre 30 et 40 ans et il semblerait que la rupture survient plus souvent à la jambe gauche qu'à la jambe droite (Jozsa et al., 1989). Également, il est plus commun de retrouver ces blessures chez ceux dont le groupe sanguin est O (Schepisis, Jones et Haas, 2002). La cause exacte de la

rupture du tendon d'Achille n'est pas connue, dans leur revue de littérature, Jarvinen et al., 2001, explique que la plupart des personnes ayant subi la rupture n'ont pas eu de symptômes auparavant.

Lors de la rupture, il est commun que les sujets révèlent avoir entendu un «snap» suivi d'une douleur soudaine à la jambe, croyant qu'ils ont été frappé par quelqu'un ou atteint par un objet par derrière (Jarvinen et al., 2001, Schepsis, Jones et Haas, 2002). Jarvinen et al., 2001, relève qu'il y a une dégénération des muqueuses, une hypoxie, une nécrose des tissus, une calcification et des fibres collagènes irrégulière en dégénérescence près du site où a eu lieu la rupture.

Saltzman et Tearse, 1998, explique qu'avec l'âge le tendon composé de fibroblaste mature subi une baisse de densité cellulaire, une baisse du diamètre des fibrilles et de leur densité. Ces auteurs ajoutent que le diamètre du tendon s'ajuste en fonction des stimuli auquel ce dernier est exposé; suite à l'exercice régulier, il y a augmentation de l'épaisseur du tendon, suite à l'inactivité ou l'immobilisation, il y a atrophie. Plusieurs auteurs arrive à la conclusion qu'une vie sédentaire affaiblissant le tendon combiné à une activité sportive induisant un stress mécanique assez fort conduirait à la rupture du tendon (Josza et al., 1989, Jarvinen et al., 2001, Schepsis, Jones et Haas, 2002).

Une étude de Wren et al., 2003, avec des tendon d'Achille frais, à montrer qu'une charge appliquée de façon cyclique ou avec un stress initial assez fort était le meilleur prédicteur à la rupture d'un tendon. La rupture du tendon survient lorsque celui-ci se fait étirer à des forces allant de 10 Mpa à 30-80 Mpa.

### 1.3.2 Traitements actuels suite à une rupture du tendon d'Achille

Plusieurs méthodes sont décrites pour traiter les ruptures du tendon d'Achille. Les méthodes peuvent être séparée en trois groupes, soit opération ouverte, opération percutanée et non opératoire (Jarvinen et al., 2001). Bien que chacune des approches comporte des avantages et des inconvénients, il n'est pas clairement établi si une approche est plus efficace

qu'une autre (Jarvinen et al, 2001, Thiery et al., 2001). Il semblerait que l'approche opératoire ouverte amènerait moins de complications subséquentes à l'opération, tel le risque de ré rupture (Jarvinen et al, 2001, Saltzman et Tearse, 1998). Par contre, lorsque comparé au risque de complication majeure induite par l'opération (infection, nécrose cutanée, blessure au nerf), les deux formes de traitements (opératoire ou non opératoire) comporte un taux de complication similaire (Saltzman et Tearse, 1998). Il en est de même pour l'opération percutanée, qui est plus économique, mais comporte elle aussi des risques d'infections et de ré rupture du tendon (Thiery et al, 2001). Cependant ces auteurs préfèrent cette méthode car si le patient respecte les consignes et la technique est bien appliquée, la réduction des risques encourus permet de rétablir le tendon sans les problèmes thérapeutique particulier lié à la suture directe du tendon. Hoefnagels et al., 2007 ont observé que la technique percutanée avec triple hémisection provoquerait plus d'échecs que le nombre rapporté jusqu'alors par la littérature. En appliquant cette technique sur les jambes de 20 cadavres humains, soit au total 60 hémisections, ces chercheurs ont rapporté qu'en étirant le tendon, 21 des 60 hémisections ont échoué sur 12 des 20 jambes. Les auteurs suggèrent l'utilisation de la méthode ouverte plus que toute autre méthodes (Hoefnagels et al., 2007). L'opération ouverte est souvent préférée par les athlètes et les jeunes sujets (Jarvinen, 2001).

Il y a immobilisation de la jambe et de la cheville pendant 6 à 8 semaines suivi de 3 à 4 semaines où la cheville passe graduellement du mouvement de flexion plantaire à la position neutre (Järvinen et al., 2001, Schepisis, Jones et Haas, 2002, Saltzman et Tearse, 1998). L'effet de l'immobilisation est bien documenté, relatant qu'une immobilisation de 6 semaines entraîne une atrophie des fibres musculaire de type I (Schepisis, Jones et Haas, 2002). Il est également démontré qu'il survient une altération du pas au niveau cinématique et neuromusculaire 12 mois après la chirurgie avec en moyenne 9 semaines d'immobilisation subséquentes. Durant une immobilisation, le tendon peut perdre entre 20 et 40% de sa substance fondamentale. Aussi, le tissu conjonctif formé par la suite peut contenir moins d'élastine (Lelièvre, Y., 2001).

La cicatrisation du tendon se fera par le passage de 3 phases distinctes. La première phase est la phase inflammatoire débutant quelques secondes après la rupture et durant environ 7

jours. Les plaquettes vont constituer un caillot, les macrophages vont détruire les débris des tissus et des cellules. Le caillot va se lier au collagène et ainsi faciliter l'activité réparatrice des cellules. Les fibroblastes seront activés au 5<sup>e</sup> jour après la rupture. La deuxième phase est la phase proliférative, débutant 3 jours après la rupture du tendon et durant environ 3 semaines. Des monocytes responsables de l'activation des fibroblastes sont présents, remaniant le tendon. Cette période est caractérisée par une orientation anarchique des fibrilles nouvellement formées et correspond à une période de faiblesse. La troisième phase est la phase de remodelage et débute environ 17 jours après la rupture du tendon. Cette phase est caractérisée par une diminution de synthèse et d'activité cellulaire. De plus, les fibrilles s'orientent de manière plus structurée, permettant l'organisation de fibres de collagènes en faisceaux. Le tendon augmente sa résistance mécanique et est alors en voie de guérison (Lelièvre, Y., 2001).

Worth, Ghosh et Maffuli, 2007 ont sondé 51 personnes ayant subi une rupture du tendon d'Achille au Royaume-Uni. Le but était de savoir des répondants comment le traitement de la rupture du tendon d'Achille est géré dans le pays. L'auteur a observé que le niveau d'activité des gens avant la rupture influence le traitement qu'ils reçoivent (la chirurgie est plus souvent employée lorsque les sujets actifs avant la rupture). L'intervention percutanée est comparable à l'opération ouverte en termes de résultats, complications et de coût (Worth, Ghosh et Maffuli, 2007). L'opération percutanée réduit le risque de blessure au niveau du nerf du triceps sural. La préférence pour l'opération percutanée augmente chez les sujets en fonction de leur niveau d'activité pré-rupture (Worth, Ghosh et Maffuli, 2007). Il n'y a pas d'homogénéité dans le type d'immobilisation utilisée malgré le fait que le type le plus populaire soit l'immobilisation de la jambe avec un plâtre sous le genou (Worth, Ghosh et Maffuli, 2007). Pour tous les sujets, la mobilisation rapide et le travail avec des poids fut suggéré et pour des fins conservatrice et éviter la ré-rupture, les sujets préalablement actifs furent assujettis à une plus longue convalescence que les autres (Worth, Ghosh et Maffuli, 2007). Également les auteurs observent qu'il n'y a pas d'homogénéité dans la façon dont le pied est immobilisé, selon la préférence du patient. Aucune différence notable ne fut observée entre ceux immobilisé en position neutre et ceux immobilisé avec un certain degré de flexion plantaire (Worth, Ghosh et Maffuli, 2007).

Les études expérimentales actuelles tendent à démontrer qu'un retour rapide à des mouvements actifs permettrait une meilleure réadaptation (Schepisis, Jones et Haas, 2002). Une étude effectuée sur 24 lapins séparés en 2 groupes a démontré que pour les animaux, la restauration des propriétés du tendon se faisait plus rapidement avec une mobilisation hâtive plutôt que lors d'une immobilisation continue lors d'une intervention chirurgicale identique visant une réparation du tendon d'Achille. Comme les sujets étaient des lapins, une étude histologique des fibres collagènes a été effectuée après les 35 jours d'immobilisation (Pneumaticos et al., 2000). Des expériences avec les mêmes visés ont été effectuées avec les humains. Une étude a évalué 71 patients ayant subi une opération suite à une rupture du tendon d'Achille. Les patients ont été séparés au hasard en 2 groupes. Le premier groupe suivait une réadaptation conventionnelle avec la jambe immobilisée dans un plâtre pendant 8 semaines. Le deuxième groupe pouvait avoir une mobilisation hâtive de la cheville avec restriction dans l'amplitude de mouvement durant 6 semaines. Les résultats n'ont pas montré de différence significative entre l'amplitude de mouvement et la force de contraction après la réadaptation. Par contre, les sujets ayant subi une mobilisation hâtive ont été en mesure de retourner à leur travail et à leur pratique d'activité sportive plus rapidement. Les auteurs en ont conclu que des mouvements hâtifs de la cheville réduit le temps nécessaire à la réadaptation sans pour autant prévenir l'atrophie (Mortensen, Skov et Jensen, 1999). Il est important de noter que l'étude n'a pas permis au sujet d'avoir un entraînement avec des charges ce qui explique en partie pourquoi les auteurs n'ont observés aucun gain en volume musculaire.

Kangas et al., 2003, on séparé 50 sujets en deux groupes. Le premier groupe subissait une immobilisation de la cheville en position neutre d'une durée 6 semaines avec un plâtre allant jusque sous le genou. Le deuxième groupe subissait une immobilisation de la cheville de 6 semaines avec une botte permettant une mobilisation hâtive de la cheville entre la position neutre et la flexion plantaire. Les 2 groupes pouvaient commencer un entraînement de force après les 3 premières semaines. Les patients ont été cliniquement observés 1, 3, 12, 24 et 60 semaines après l'opération. Les résultats ont montré une amélioration plus rapide de la force

de contraction dynamique des mollets chez le groupe ayant subi la mobilisation hâtive. Après 3 mois et lors de la dernière évaluation clinique, les résultats entre les deux groupes étaient similaires autant au niveau de la force dynamique qu'au niveau de la douleur ressentie, la raideur du tendon, la sensation subjective de force, l'amplitude de mouvement. Les auteurs en sont venus à la conclusion qu'un mouvement hâtif de la cheville peut être utile pour les athlètes ou autre personne active voulant une réadaptation rapide, sinon, la réadaptation traditionnelle, bien que plus lente est tout aussi efficace à long terme. Évidemment dans ces 2 cas, l'étude histologique des tendons des sujets a été impossible.

Une étude a mesuré la force isométrique de la jambe de 40 sujets ayant subi une rupture du tendon d'Achille. La force était comparée à celle de la jambe controlatérale. 18 des sujets avait été opérés, 22 avait été traités sans opération. Chacun des sujets avait subi la rupture du tendon depuis plus d'un an avant l'étude. Les résultats ont montré une force significativement moins grande de la jambe blessée pour l'ensemble des sujets sans que la forme de traitement n'influence les résultats. Les chercheurs en sont venus à la conclusion que la perte de force de la jambe peut être une adaptation chronique associée à la rupture du tendon d'Achille (Bressel et McNair, 2001).

Comme le traitement opératoire amène une période d'immobilisation un peu plus courte, ceci explique sans doute la raison pour laquelle la force dynamique est légèrement plus grande chez ceux traité par l'opération ouverte (Saltzman et Tearse, 1998). Une étude menée à des exercices fonctionnels avec charge permet de retrouver 97% de la force d'origine après 12 mois (Schepesis, Jones et Haas, 2002). Certains auteurs, après revue de littérature, affirment que l'idéal serait de cesser l'immobilisation totale après 3 semaines en plaçant la jambe dans une botte permettant quelques mouvements limités de la cheville et de lentement passer de la flexion dorsale à la flexion plantaire. Retirer la botte après 8 semaines, de débiter un jogging léger après 3 mois si la cheville est en mesure de retourner en complète dorsiflexion. Le retour complet à la course, au saut et au sport entre 4 et 6 mois, si le gain en force est adéquat (Schepesis, Jones et Haas, 2002). La force du mollet n'est pas totalement retrouver même après plus de 12 mois (Saltzman et Tearse, 1998). La perte de force de la jambe blessée est donc chronique (Bressel et McNair, 2001). Il est aujourd'hui improbable



que le mollet retrouve complètement le volume qu'il avait avant la rupture du tendon (Mortensen, Skov et Jensen, 1999).

Selon De Bisschop et al., 2001, la complète réversibilité du phénomène de fonte musculaire survenant après l'immobilisation consécutive aux atteintes tendino-articulaire est une croyance erroné. Cette fausse croyance a fait en sorte que le phénomène à souvent été négligé jusqu'aux périodes récentes. Dans une étude, Alfredson et al., 1998, ont comparé la force concentrique et excentrique lors du mouvement de flexion plantaire de 7 hommes et 4 femmes souffrant de tendinite au tendon d'Achille. Les mesures était prise avant et après traitement chirurgical. Chacun des patients était immobilisé pour 2 semaines avant d'entreprendre un programme d'entraînement en force pour réadapter la jambe blessée. Les mesures de force étaient prises avant l'opération (semaine 0), puis 16, 26 et 52 semaines après l'opération. Le but de l'étude était de faire une comparaison des résultats avec une étude similaire effectuée en 1996 par les mêmes auteurs, à la différence que les sujets, 10 hommes et 3 femmes, étaient immobilisés pendant 6 semaines à la place de 2 semaines. Les auteurs ont observées des résultats similaires dans les 2 études. La force concentrique et excentrique de la jambe blessée était beaucoup moins grande à la semaine 16 comparativement à la semaine 0 (avant l'opération). Aussi, la force de la jambe blessée comparativement à la jambe non blessée à été plus faible lors des semaines 16 et 26 et égale à la semaine 52. Ces résultats on amené les auteurs à conclure qu'il n'y avait pas de différence significative entre une immobilisation de 2 semaines et une immobilisation de 6 semaines pour la réadaptation d'une tendinopathie.

Également, ces 2 recherches ont montrées que la réadaptation de la jambe blessée est lente. Une étude de Maxwell, Moody et Enwemeka, 1992 effectuée sur des lapins a comparé l'atrophie du tendon d'Achille suite a une rupture. Le but de l'étude était de déterminer si une mobilisation plus rapide de la jambe avait une influence sur l'atrophie et la réadaptation du muscle. L'expérience a montré une atrophie similaire pour le groupe ayant subi une mobilisation hâtive comparativement à celui ayant subi une immobilisation prolongée. Les effets de l'immobilisation concernaient particulièrement les fibres musculaires de type I. Cependant, le groupe ayant subi une mobilisation hâtive a pu bénéficier d'une réadaptation

plus rapide. Bien qu'il existe des différences entre l'humain et le lapin, cette étude suggère que la mobilisation rapide de la jambe après rupture ne va pas empêcher l'atrophie des fibres lente du soléaire mais peut faciliter la réadaptation de celui-ci.

Une étude semblable a été effectuée chez l'humain. Maffulli et al., 2003 a comparé la force de deux groupe de 22 et 23 sujets ayant subi une opération suite à une rupture du tendon d'Achille. Un des groupes pouvait commencer un entraînement en force après 2 semaines d'immobilisation et l'autre devait attendre les 6 semaines habituelles avant de commencer la réadaptation. Les résultats ont montrés que les sujets ayant subi une mobilisation hâtive de leur jambe blessée ont recouvré plus rapidement la pleine amplitude de leurs mouvements sans pour autant affecté la réparation du tendon. Cependant, aucune augmentation de force ou réduction de l'atrophie n'a été observé ni dans les groupe ayant subi une mobilisation hâtive, ni dans les groupes ayant subi une réadaptation traditionnelle.

Une étude de Schepull et al. 2007 a observer par divers mesures dont la force du tendon et une évaluation de la qualité du tendon de 10 sujets ayant subi une rupture du tendon d'Achille afin de comparer leur évolution après 6, 12, 18 semaines et finalement après 1 an. Le but de l'étude était d'observer si une telle évaluation pouvait prévoir le niveau de guérison attendue. L'étude de Schepull et al., 2007 à révélé plusieurs différences interindividuelles dues à des facteurs biologique où due à la blessure comme telle. Notamment en observant l'absence de corrélation entre la force générée lors de la contraction des fléchisseurs plantaire et la tension produite dans le tendon (Schepull et al., 2007) . Les sujets ayant une tension très élevée par rapport à la force employée seraient donc sujet plus facilement que les autres à subir une nouvelle rupture. Les auteurs notent aussi l'importance de l'entraînement pour justifier l'observation de variances dans changements entre la condition des sujets après 1 an.

#### 1.4 Conclusion

Le but de cette section est de résumer les faits saillants pouvant apporter une aide au projet de recherche. L'électrostimulation peut s'avérer efficace pour remplacer ou compléter un entraînement en contraction volontaire. L'amplitude, la durée du train d'ondes et la

fréquence de stimulation doit être prise en ligne de compte afin d'obtenir une tétanie, c'est-à-dire de recruter l'ensemble des fibres musculaires. Cela doit être achevé avec le plus grand confort possible pour le sujet. Plusieurs protocoles de stimulation électrique ont augmenté la force isométrique, concentrique et excentrique de différents muscles. Bien que la plupart des études ont été effectuées sur le quadriceps, certaines ont été effectuées sur le triceps sural avec des gains de force. Il serait possible d'obtenir un gain de masse en engendrant au muscle des micro-déchirures qui enclencherait le mécanisme d'activation, de prolifération et de fusion des cellules satellites, principales responsables de l'hypertrophie et possiblement de l'hyperplasie musculaire. Aucun gain de masse par électrostimulation sur le triceps sural n'a été répertorié à ce jour. L'entraînement devra, selon le principe d'individualité être ajusté en fonction des capacités de chacun des sujets. Cet entraînement devra être spécifique à la connaissance que nous avons sur le gain de force et de masse musculaire, c'est à dire créer des contractions générant idéalement près de 70% de la force maximale et amener le muscle jusqu'à la fatigue. L'entraînement devra être effectué sur une base régulière en augmentant peu à peu la charge de travail au fur et à mesure que notre sujet progresse.

## CHAPITRE II

### MÉTHODE

#### 2.1 Introduction

La rupture du tendon d'Achille provoque chez la personne l'ayant subi une perte de force et de volume chronique, particulièrement au niveau des jumeaux. L'objet de ce projet de recherche est de vérifier si la force et le volume de la jambe blessée peuvent être augmentés avec l'aide d'un entraînement en électrostimulation.

#### 2.2 Sujets

Huit sujets (5 hommes et 3 femmes) ont participé à l'étude jusqu'à la fin soit 5 dans le groupe expérimental et 3 dans le groupe témoin. Aucun des sujets ayant participé à la recherche n'ont subi préalablement une rupture du tendon d'Achille.

##### 2.2.1 Critères d'inclusion

Une priorité aux sujets ayant subi une rupture du tendon d'Achille a été émise lors d'une première sélection de sujets. Le nombre de sujet recruté de cette manière étant trop restreint, les critères de sélection ce sont modifiés lors de la deuxième sélection.

Les sujets devaient être disponibles pour suivre l'entraînement en électrostimulation de 8 semaines.

Les sujets devaient également être disponibles pour subir un pré-test, un test intermédiaire et un post-test mesurant la force et le volume de leur jambe.

Les détails sur les tests et l'entraînement sont donnés dans les sections suivantes.

### 2.2.2 Critères d'exclusion

Les sujets ne devaient pas prendre de produits pouvant influencer la croissance musculaire étant donné que c'est la variable dépendante que nous mesurerons avant et après l'entraînement. Tout sujet prenant des hormones connus pour avoir ces effets (HGF, IGF1, hormones de croissance, bloqueurs de NO ou autres anabolisants) ont été exclus de la recherche (Wozniac et al., 2005).

### 2.2.3 Aspects déontologiques et consentement

Chaque sujet a signé un formulaire de consentement éclairé (voir formulaire en annexe). Chacun des sujets était totalement libre de participer ou non à l'étude et était totalement libre de quitter à n'importe quel moment sans subir de préjudice d'aucune façon que ce soit. Les membres du projet de recherche étaient informés et se sont soumis aux normes concernant l'éthique dans la recherche avec des sujets humains. Le projet a été soumis et accepté par le comité d'éthique du département de kinanthropologie de l'UQÀM (voir document en annexe).

L'appareil utilisé pour l'électrostimulation est utilisé par des thérapeutes du sport et fut utilisé selon les normes du fabricant. Afin de réduire les risques de blessure pour les sujets, l'expérimentation pouvait être arrêtée à n'importe quel moment, dès l'instant où le sujet ou un des responsables de recherche juge qu'il y a un risque trop grand pour la santé du sujet.

## 2.3 Conditions

Les sujets ont été répartis aléatoirement en deux groupes: un groupe expérimental (5 sujets, 4 hommes et 1 femme) et un groupe témoin (3 sujets, 1 homme et 2 femmes).

### 2.3.1 Groupe expérimental

Le groupe expérimental s'est soumis à un pré-test mesurant la force et le volume de la jambe droite et gauche suivi d'un entraînement de 8 semaines en électrostimulation à raison de 3 fois par semaine.

Le groupe expérimental s'est soumis aussi à un test intermédiaire après 4 semaines d'entraînement et à un post-test après 8 semaines d'entraînement.

#### 2.3.1.1 Pré-test, test intermédiaire et post-test

Le groupe expérimental s'est soumis à un pré-test mesurant la force et le volume de sa jambe droite et gauche. Lors de ce pré-test, 3 différentes mesures de force en utilisant un dynamomètre (Kin-Com, voir plus bas) ont été effectuées soit : la force de contraction isocinétique maximale à une vitesse de  $30^{\circ} \cdot s^{-1}$  lorsque l'angle jambe-pied passe de  $90^{\circ}$  au plus grand angle possible ( $125$  à  $155^{\circ}$ ) lors de contractions concentriques et excentriques, la force de contraction isométrique maximale lorsque l'angle jambe-pied est à  $90^{\circ}$ , la force de contraction isométrique maximale induite par électrostimulation lorsque l'angle jambe-pied est à  $90^{\circ}$ . Également la mesure de volume effectuée fut la mesure de la circonférence en utilisant un ruban de type Gullick II (voir plus bas) de la jambe à hauteur du ventre des gastrocnémiens et la prise du pli cutané du mollet à la hauteur du ventre des gastrocnémiens.

Le groupe expérimental fut réévalué lors d'un test intermédiaire après 4 semaines d'entraînement et lors d'un post-test à la fin des 8 semaines d'entraînement. Le test intermédiaire fut constitué de trois mesures de force de contraction des jambes (concentrique,

excentrique et isométrique lorsque l'angle jambe-pied fut à 90 °) ainsi que d'une prise de circonférence des jambes au niveau des gastrocnémiens et d'une mesure du pli cutané au niveau du ventre des gastrocnémiens. Le but du test intermédiaire est d'observer le changement en force par rapport au changement de volume, sachant que le système nerveux central influence la force de contraction (Gandevia et al. 2001).

Le post-test fut identique au pré-test passé 8 semaines plus tôt. Le choix de 8 semaines fut établi pour voir apparaître une adaptation à l'entraînement par hypertrophie musculaire donc avec gain de volume de la jambe.

Les heures d'entraînement et de passation des tests furent le plus identique possible (passé au même moment de la journée) afin que l'influence du rythme biologique du corps humain se fasse le moins sentir possible (revue de Kelly 2006).

#### 2.3.1.2 Entraînement en électrostimulation

Le groupe expérimental a subi un entraînement en électrostimulation trois fois par semaine pendant huit semaines. L'appareil utilisé fut le modèle Omnistim 550B (Electrotherapy system). Ce type d'appareil est généralement utilisé par les thérapeutes de sport. L'indication de stimulation fut pour réduire une atrophie de sous-utilisation «reduce disuse atrophy» et le protocole choisi fut de type endurance. Le type d'onde utilisée (figure 2.1) fut une onde rectangulaire asymétrique biphasique LPVC (Low Voltage Pulsed Current). L'avantage de l'utilisation de ce type d'onde est qu'elle donne un 0 net dans le déplacement des ions, réduisant ainsi les risques de brûlures et d'alcalose ou d'acidose cutanée. (Decherchi et al. 2002, Manheimer et Lampe, 1984).

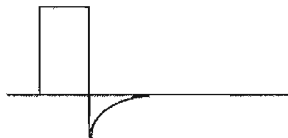


Figure 2.1- Onde rectangulaire asymétrique biphasique (Omnistim 500B manuel de l'utilisateur)

Bien que le protocole original de l'appareil est un protocole d'endurance. Ce dernier fut modifié dans le but de provoquer un gain de force. Le fond de l'entraînement demeure toutefois en endurance pour limiter les risques de blessure étant donné qu'il s'agit d'une jambe ayant subi une rupture du tendon d'Achille depuis peu de temps. Le programme en électrostimulation était sujet à cesser si un risque de blessure fut décelé par le chercheur, le thérapeute du sport ou par le sujet lui-même, ce qui ne fut pas le cas. (Inflammation dans la région du tendon, douleur prolongée, etc).

Le protocole s'inspire de celui expérimenté par Martin et al., 1994 ayant obtenu un gain en force significatif du triceps sural chez des sujets «sains». La durée de la période d'entraînement a été allongée à 8 semaines plutôt que 4, afin d'observer un gain en volume en plus du gain en force.

La durée totale de l'entraînement par électrostimulation fut de 15 minutes plutôt que de 30 minutes étant donné que nous voulons réduire le temps nécessaire pour créer une fatigue musculaire en augmentant plutôt la force de contraction générée par le muscle par électrostimulation.

La durée d'un cycle fut 300  $\mu$ s plutôt que de 200  $\mu$ s qui est un temps suffisant pour stimuler le nerf moteur. Cette durée de cycle s'accorde selon la chronaxie d'une cellule nerveuse myélinisée (Maitre, 2000).

La fréquence employée fut une fréquence de 50 à 75 Hz plutôt que de 10 Hz. Cette fréquence fut progressivement augmentée au cours de l'entraînement pour le sujet blessé (le sujet n'a pas terminé l'étude). Pour les sujets sains, la fréquence employée fut de 75 Hz dès le départ de l'expérimentation. Le but est d'employer une fréquence suffisamment élevée pour produire une contraction tétanique (Maitre, 2000) générant idéalement environ 80% de la force de contraction maximale (Cometti, 1994). Une telle force de contraction ne peut pas s'obtenir avec une fréquence de 10 Hz. Une fréquence de 75 Hz fut utilisée dans 2 études et a montré un gain de force. Ces études furent effectuées avec des sujets sains. Comme nous



avons du traiter en partie avec des sujets ayant subi une rupture du tendon d'Achille, une fréquence plus basse (50 Hz) fut utilisée au début pour prévenir le risque de blessure. Cet entraînement apportera un gain de force et en volume avec beaucoup moins de risque de blessure pour la jambe des sujets qu'un entraînement en force pur qui se fait avec des contractions plus fortes et un temps plus court.

La période de tension fut d'une durée de 5 secondes et la période de repos fut d'une durée de 15 secondes plutôt que 10, étant donné que la contraction générée était plus forte à cause de la fréquence utilisée qui était plus élevée (le muscle a reçu un repos plus long).

Le front de montée pour un train d'impulsion (temps pendant lequel l'appareil passe d'une intensité nulle à l'intensité désirée) fut de 1 seconde. Le temps du front de montée doit être suffisamment rapide pour empêcher que le tissu s'accommode et que la contraction musculaire soit efficace (Decherchi et al., 2002) . Le front de descente fut de 1 seconde également.

La tension ou l'intensité du courant fut déterminé par le maximum que le sujet pouvait tolérer sans risque trop grand pour la jambe.

Les sujets furent appelés à tenir un journal de bord durant leur 8 semaines d'entraînement. Ce journal a servi à aider le responsable de recherche à ajuster les paramètres de l'entraînement en fonction de l'intensité et de la durée des douleurs ressenties. Il est évident que les perceptions de l'effort du sujets peuvent à elle seule être trompeuse (Merton, 1954), c'est pourquoi le journal n'a pas été le seul facteur prit en ligne de compte pour ajuster l'intensité de l'entraînement.

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Figure 2.2- Exemple de journal de bord que le sujet devra remplir.

### 2.3.2 Groupe témoin

Le groupe témoin s'est soumis à un pré-test identique au groupe expérimental afin de mesurer la force et le volume de leur jambe blessée et non blessée.

Le groupe témoin s'est également soumis à un test intermédiaire identique au groupe expérimental après 4 semaines et à un post-test identique au pré-test après les 8 semaines.

## 2.4 Mesures

Lors du pré-test, du test intermédiaire et du post-test, plusieurs mesures de force et de volume furent effectuées. La présente section définit précisément les mesures de force et de volume utilisées avec les techniques employées pour collecter les données.

### 2.4.1 Mesures de la force de la jambe

Trois mesures de force maximale différentes furent utilisées lors des différents tests, soit : la force maximale de contraction isocinétique concentrique, la force maximale de contraction isocinétique excentrique et la force maximale de contraction isométrique.

La force de contraction maximale isocinétique concentrique et excentrique fut mesurée lorsque l'angle jambe-pied passa respectivement d'un angle de 90 ° au plus grand angle de flexion possible par le sujet (entre 125 et 155 °) et vice versa. La vitesse de contraction fut de 30 ° par secondes. Trois contractions maximales furent mesurées pour évaluer la force de contraction concentrique et excentrique.

La force de contraction maximale isométrique fut mesurée lorsque l'angle jambe-pied fut de 90 °. La durée totale de la contraction fut de 5 secondes. La force de contraction isométrique provoquer par électrostimulation fut mesurée dans les mêmes conditions. Trois contractions isométriques maximales furent mesurées pour évaluer la force de contraction isométrique maximale volontaire.

L'appareil utilisé pour mesurer toutes les forces de contraction fut le dynamomètre Kin-Com. L'appareil est normalement utilisé pour mesurer la force de contraction de différents muscles tel les quadriceps ou encore les muscle responsables de la flexion plantaire et est souvent utilisé dans le milieu scientifique, il est bien connu comme étant valide et fidèle (utilisé en autre par Bressel et McNair, 2001).

#### 2.4.2 Mesures de volume de la jambe

Deux mesures de volume différentes furent utilisées lors des différents tests, soit : la circonférence de la jambe à au niveau du ventre des gastrocnémiens et le pli cutané du mollet à la hauteur du ventre des gastrocnémiens.

Pour mesurer la circonférence du mollet, un ruban de type «Gulick II» (Country Technologie, Inc., Gay Mills, WI) fut employé. Ce ruban assure que la force déployée lorsque l'on prend la mesure est toujours constante. La circonférence d'un membre est souvent utilisée pour faire l'estimation de la composition corporelle (Kirkendall, Gruber et Johnson, 1987). Dans notre cas, elle servi à estimer le gain en volume de la jambe. Plusieurs endroits sont fréquemment utilisés pour la prise de telle mesure (figure 2.3), le ventre des gastrocnémiens étant l'un d'eux.

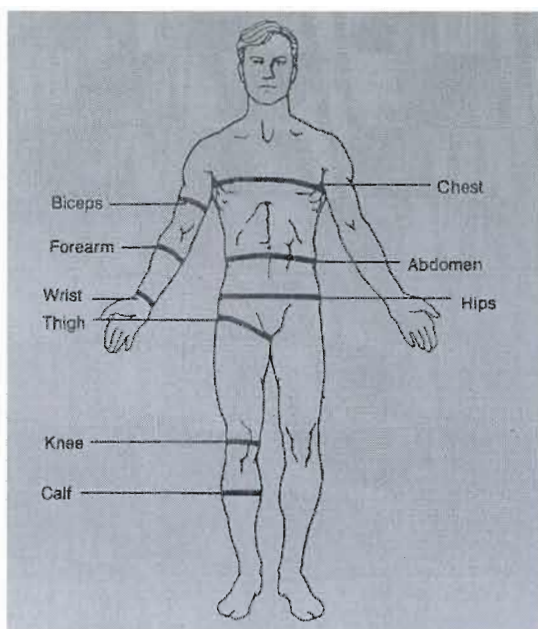


Figure 2.3- Différents sites utilisés pour la prise de circonférence permettant d'évaluer la composition corporelle (Kirkendall, Gruber et Johnson, 1987)

Les avantages d'utiliser une telle méthode sont qu'elle procure des informations rapides et fiables à propos du sujet. Par contre, le désavantage majeur de l'emploi de cette méthode est qu'elle donne peu d'informations sur la nature de la composition du membre en termes de masse musculaire et de masse adipeuse (Howley et Franks, 1997). Cependant, étant donné nos connaissances actuelles sur l'entraînement, il nous est possible de justifier le gain de volume éventuel des sujets comme étant un gain de masse musculaire, particulièrement si ce gain de volume est accompagné par un gain de force après les 8 semaines d'entraînement. Pour s'assurer une bonne fiabilité, chacune des circonférences furent mesurées 3 fois.

Aussi afin de confirmer que la variation de volume n'est pas influencée par un changement au niveau de la masse adipeuse du mollet, la mesure du pli cutané du mollet de chaque sujet a été prise avant et après les 8 semaines d'entraînement et lors du test intermédiaire après 4 semaines d'entraînement. La pince utilisée fut l'adiposomètre médical ERP1080 de marque Jamar. Cette mesure fut prise selon les directives du physitest normalisé

canadien élaboré en 1986 par une équipe de spécialistes en évaluation de la condition physique (voir Fig 2.4).



Figure 2.4- Prise du pli cutané

L'avantage d'utiliser cette mesure est que sa validité est démontrée pour évaluer la composition corporelle de l'ensemble du corps d'un individu. Dans le cas présent, seul la mesure du pli cutané du mollet sera prise. Étant donné qu'il s'agit de la variation de volume adipeux au niveau de la jambe et non pas l'évaluation de la composition corporelle du corps en entier, il nous est inutile d'appliquer l'ensemble des autres mesures aux autres parties du corps pour le projet. Pour assurer une bonne fiabilité, la mesure du pli cutané fut prise 3 fois.

## 2.5 Procédures

Voici la description de la série d'événements nécessaire au déroulement de l'expérience, de la réception à la fin de l'expérimentation.

### 2.5.1 Éthique et consentement

Le sujet entre d'abord en contact avec l'équipe de recherche. À ce moment le but de l'expérience est clairement expliqué au sujet, ainsi que les risques d'aggraver sa blessure qu'il court en participant à l'expérience. Aussi sont expliqués en détails les bénéfices éventuels (gain de force, gain en volume) auxquels il s'expose en participant au projet. Les

responsables de recherche expliquent aussi les moyens utilisés pour réduire au maximum les risques pour le sujet (entraînement progressif, suivi par un thérapeute du sport, utilisation périodique d'un journal de bord pour observer toute douleur prolongée sur une longue période). Les responsables de recherche informe alors le sujet qu'il est totalement libre de participer ou non à l'expérience et dans l'affirmative, il peut arrêter quand bon lui semble et ce, peu importe la raison. Les responsables de recherche explique au sujet les modalités auxquelles il doit se soumettre pour participer à l'expérience (participer au pré-test, test intermédiaire et post-test, avoir à suivre un entraînement en électrostimulation d'une durée approximative de 45 minutes 3 fois par semaine dans les laboratoires de l'UQÀM). Les responsables de recherche répondent alors à toute autres questions que le sujet peut avoir par rapport à l'expérience.

#### 2.5.2 Pré-test

Lors de la première visite du sujet en laboratoire. Un pré-test mesurant la force et le volume de la jambe fut effectué. Avant la prise des mesures proprement dites, le sujet dut faire un échauffement de 10 minutes sur un vélo stationnaire afin d'activer la circulation sanguine et de préparer le corps à l'effort. Par la suite, des étirements de différents groupes musculaires de jambes furent effectués.

La première mesure effectuée fut la force isocinétique maximale lors de 3 contractions concentriques et excentriques à une vitesse de  $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ . L'appareil fut ajusté pour avoir un mouvement de la cheville (ANKLE) et isoler les muscles responsables de la flexion plantaire (PLANT FLEX). Le sujet du s'installer dans une position assise avec la jambe tendue (genou à  $0^{\circ}$ ) afin qu'aucun autres muscles que ceux responsables de la flexion plantaire n'interviennent dans le mouvement. La position du support et du banc furent notés par le responsable de recherche afin qu'elle fut identique lors de la passation du test intermédiaire et du post-test.

Une compensation pour la gravité (GRAVITY COMPENSATION) fut inscrite dans le dynamomètre Kin-Com afin que la force gravitationnelle n'influence pas la mesure de force lors du mouvement de flexion plantaire.

Le choix du protocole fut un protocole isocinétique (ISOCINETIC) et le bras de levier (LEVER ARM) fut ajusté selon la grandeur pied du sujet pour que le mouvement de flexion soit le plus confortable possible pour le sujet (entre 11 et 15 cm). La grandeur du bras de levier fut noté par le responsable de recherche afin qu'elle fut la même lors de la passation du test intermédiaire et du post-test.

Avec l'aide d'un goniomètre, l'angle jambe-pied fut mesuré et placé à 90° et inscrite dans l'appareil (SELECT JOINT POSITION). Ensuite, le mouvement de départ (START ANGLE) fut sélectionné à 90 ° pour chacun des sujets et l'angle de fin (END ANGLE) fut sélectionné entre 125 et 155 ° selon la souplesse de la jambe des sujets. L'angle de début et de fin de chaque sujet furent notées par le responsable de recherche afin qu'elles furent identiques à celles du pré-test lors de la passation du test intermédiaire et du post-test.

L'amplitude de mouvement a une grande influence sur la force générée par la contraction musculaire. La théorie du glissement des filaments d'actine sur la myosine peut nous amener de précieux indices sur le moment où la force maximale de contraction est générée. Il va s'agir du moment où les filaments d'actine sont en plus grand contact avec ceux de myosine. Bien qu'il est difficile que cette théorie soit applicable lors de mouvement dynamiques, plusieurs études ont montrées que la force générée est en fonction de la longueur des sarcomères. Il a été également démontré que le moment de force à un certain angle musculaire dépendait du bras de levier et de la longueur des sarcomères. (Rassier, MacIntosh et Herzog, 1999). C'est pourquoi, comme un angle donné influence la longueur des sarcomères, l'angle et le bras de levier doit tous deux être constant lors du pré test et du post test. Le but du projet est de constater si le sujet est en mesure de générer une plus grande force en conservant la même amplitude de mouvement et le même bras de levier après les 8 semaines d'entraînement par électrostimulation.

La vitesse sélectionnée (SPEED) sera de  $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ . La force pour que débute le mouvement sera de 50 N (START FORCE), la force minimale 20 N (MIN FORCE) et la force maximale sera de 200 N (MAX FORCE). Le type de contraction sélectionné sera concentrique / excentrique (CONTRACTION TYPE : CON / ECC).

En effet, comme il existe différents types de fibre musculaire, la variation de la vitesse employé lors du mouvement peut influencer grandement la force générée par la contraction musculaire (Baldwin et al., 2003). Il est donc primordial que la vitesse de contraction soit constante autant lors du pré-test que dans le test intermédiaire et dans le post-test.

Le sujet fut installé sur le dynamomètre Kin-Com et des courroies en velcros furent installées pour bien immobiliser le pied sur le bras responsable de la mesure de force. La force minimale requise pour que l'appareil enregistre et démarre le mouvement (MIN FORCE) fut ajustée à 50 N pour les contractions concentriques (START FORWARD) et fut ajustée entre 20 et 30 N selon la force enregistrée par l'appareil lorsque la jambe fut au repos pour les contractions excentrique (START BACKWARD). Ces deux forces minimales requises furent notées par le responsable de recherche et furent les mêmes lors de la passation du test intermédiaire et du post test. Lorsque le sujet fut prêt, l'angle jambe-pied étant à  $90^{\circ}$ , le dynamomètre fut placé en mode d'enregistrement (START MEASURE) et le sujet effectua la plus forte contraction possible. Les encouragements du responsables de recherche furent standardiser (Vas-y, vas-y, vas-y!) pour chacun des sujets afin d'influencer le moins possible les fluctuations dans la mesure des résultats (Gandevia, 2001). Il fut possible pour le sujet d'avoir une rétroaction constante de l'effort qu'il fournit en regardant la courbe de sa force mesurée sur l'écran de l'appareil et il fut possible pour le sujet de refuser une contraction s'il juge qu'elle est manquée, de façon à ce que la mesure de la force fluctue le moins possible (Gandevia 2001). Aussi, le sujet eu droit à une pratique pour être à l'aise dans l'exécution du mouvement avant que sa mesure de sa force de contraction maximale ne fut enregistrée dans l'ordinateur du dynamomètre (Gandevia 2001). Finalement, le sujet fut informé qu'il pouvait en tout temps arrêter l'appareil en appuyant sur le bouton d'arrêt d'urgence qui lui fut remis en main propre durant toute la durée des différentes mesures de force. Lorsqu'un premier effort maximal fut fournit et enregistré (SAVE- YES), le sujet se reposa alors en demeurant



sur le dynamomètre Kin-Com durant 5 minutes où jusqu'à ce qu'il se disait de nouveau prêt à fournir un effort maximal. L'angle jambe pied est fut alors aux alentours de 140 ° et le sujet effectua alors une contraction excentrique maximale selon le même protocole. Les étapes de repos puis de contraction maximale concentrique et excentrique furent reprises deux fois selon le même protocole afin d'enregistrer trois contractions maximales concentriques et excentriques.

Ces mesures furent effectuées d'abord avec la jambe non-blessée (dans le cas où le sujet avait subi la rupture du tendon), ensuite avec la jambe blessée du sujet. Le test commença avec la jambe non-blessée afin d'habituer le sujet aux procédures avec une jambe moins susceptible de subir une blessure lors du test pour que ce dernier sache à quoi s'attendre lors de la mesure avec sa jambe blessée. Les mesures des deux jambes furent effectuées afin de discuter de l'évolution de la force de la jambe blessée comparativement à la jambe non-blessée. Cependant, même si le principe de spécificité est effectif lors de l'entraînement de la jambe blessée, nous nous attendons néanmoins à une augmentation de la force de la jambe non-blessée due à l'effet controlatéral qu'amène l'entraînement d'une seule jambe (Shima et al., 2002).

La deuxième mesure effectuée fut la mesure de la force isométrique maximale des fléchisseurs plantaires lorsque l'angle jambe-pied est à 90°. Le sujet fut déjà installé correctement sur l'appareil ayant terminé la mesure précédente. Le protocole choisi fut changé maintenant pour un protocole isométrique (PROTOCOL-ISOMETRIC) et l'angle sélectionné pour la mesure fut de 90°, un autre angle sélectionné sera un angle à 5° près mais ne sera pas utile lors du traitement des données. Les procédures de pratique préalable, de rétroaction standardiser, de temps de repos et d'enregistrement de la force maximale furent les mêmes que celles décrites plus haut sauf que le protocole est en isométrique plutôt qu'en isocinétique. La force minimale requise pour que l'appareil commence à enregistrer la force de contraction fut de 50 N pour chaque sujet et cette force fut notée par le responsable de recherche pour qu'elle soit la même lors du test intermédiaire et lors du post-test. La durée de la contraction fut de 5 secondes. Trois mesures de force isométrique maximale à un angle de 90 ° furent enregistrées.

Le sujet put alors débarquer du dynamomètre Kin-Com et se préparer pour les mesures de volume.

La troisième mesure effectuée fut la circonférence de la jambe au niveau du ventre des gastrocnémiens. Pour mesurer la circonférence du mollet, un ruban de type «Gulick II» fut employé. Ce ruban assura que la force déployée lorsque la mesure fut prise était toujours constante. Le sujet dut se placer debout en prenant soin d'enlever ses bas et ses souliers et de porter des pantalons court ou de relever son pantalon afin que le responsable de recherche puisse facilement enrouler le ruban autour de la jambe du sujet. L'expérimentateur prit la circonférence le plus exactement possible au niveau du ventre des gastrocnémiens (l'endroit où le mollet est le plus proéminent).

La quatrième et dernière mesure effectuée fut la prise du pli cutané au niveau du ventre des gastrocnémiens. La prise du pli cutané se fit avec un adiposomètre (pince) ERP 1080 de marque Jamar. Le sujet se plaça debout, le pied droit détendu sur une marche, le genou formant un angle de 90 degrés. Le pli fut pris à l'intérieur de la jambe, à la hauteur du ventre des gastrocnémiens (voir figure 2.4). (Physitest normalisé canadien, 1986). La mesure fut prise 3 fois par jambe. Cette mesure concerna les 2 jambes de chaque sujet.

Après l'ensemble des mesures, une période d'étirement des muscles de la jambe et de retour au calme de 5 minutes sur vélo stationnaire fut effectuée par le sujet pour assurer que celui-ci était en mesure de quitter le laboratoire en toute sécurité. En cas de malaise, une période de repos plus longue pouvait être offerte (ce qui n'a pas été nécessaire).

La durée du pré-test fut environ de 1h 15 minutes.

### 2.5.3 Entraînement en électrostimulation

Les sujets du groupe expérimental furent alors convoqués à plusieurs séances d'entraînement en électrostimulation trois fois par semaine durant huit semaines, le plus possible dans les mêmes heures à chaque fois et selon leurs disponibilités.

Les sujets furent aussi familiarisés avec le journal de bord et le responsable de recherche expliqua que le sujet devait quotidiennement évaluer son niveau d'effort physique au travail, pendant la réadaptation et pendant ses loisirs. Il dut aussi évaluer le niveau de douleur perçue par l'entraînement par électrostimulation. Le responsable de recherche expliqua l'importance de cet outil pour l'ajustement des paramètres de stimulation dans un contexte à la fois d'entraînement et de sécurité pour la jambe blessée (ou simplement entraînée du sujet).

À chaque séance d'entraînement en électrostimulation, le journal de bord fut consulté et le responsable de recherche s'assura que la douleur n'empêchait pas à mesure que l'entraînement progresse mais suivait plutôt un cycle de fatigue et de récupération, nécessaire à tout entraînement.

La séance d'entraînement en électrostimulation fut suivie par un échauffement identique à celui présenté lors du pré-test de la section précédente (2.5.2).

Le sujet fut ensuite placé en position debout et la cheville du sujet fut placée en dorsiflexion le plus possible sur une planche afin d'étirer les muscles responsables de la flexion plantaire et ainsi de créer des microdéchirures responsables du gain de volume (Weineck, 1997, Cometti, 2005).

Des électrodes composées d'éponges humides circulaires de 8,5 cm de diamètre furent apposées selon la technique bipolaire et apposées sur les points moteurs des gastrocnémiens (Dumoulin et De Bisschop, 1984). La peau du sujet fut soigneusement inspectée et nettoyée à

l'endroit où seront apposé les électrodes en plus d'être vérifiée en cours de traitement pour assurer une conduction idéale et prévenir les risques de brûlure (Portmann, 1991).

L'appareil Omnistim 550 B fut employé selon le protocole expliqué plus haut (section 2.3.1.2). Soit INDICATION : REDUCE DISUSE ATROPHY, PROTOCOL : ENDURANCE, TIME : 15 MINUTES, PHASE : 300  $\mu$ s, FREQUENCY : 50 Hz à 75 Hz (selon la forme du sujet, plus le sujet est en forme et ne ressent aucune douleur et plus la fréquence fut élevée), T-ON : 5 SEC, T-OFF : 15 SEC, RAMP UP : 1 SEC, RAMP DOWN : 1 SEC, A-B SIMULTANEOUS (courant envoyé simultanément dans les deux paires d'électrodes utilisées).

Le responsable de recherche s'assura que le sujet fut prêt et augmenta doucement l'intensité du courant jusqu'à ce que celui-ci dise ressentir une contraction suffisamment forte. À ce moment, le responsable débuta la période de 15 minutes d'électrostimulation. Le sujet fut muni du bouton d'arrêt d'urgence et fut avisé qu'il pouvait appuyer dessus en tout temps pour arrêter instantanément l'électrostimulation s'il ressentait un inconfort marqué ou s'il ressentait un danger imminent de blessure à sa jambe. Durant la période de stimulation, le responsable de recherche observa le sujet en s'assurant que la jambe du sujet ne subissait pas de brûlure cutané ou de blessure due à une électrostimulation excessive. Après l'entraînement, le responsable de recherche retira les électrodes et inspecta la peau du sujet pour observer qu'il n'y ait pas de traces de brûlure cutané ou de rougeurs anormales.

La période d'entraînement fut suivie d'un retour au calme de 5 minutes avec un protocole identique à celui présenté lors du pré-test à la section précédente (2.5.2).

La durée de l'entraînement en électrostimulation fut d'environ 45 minutes.

#### 2.5.4 Test intermédiaire

Un test intermédiaire mesurant la force et le volume de la jambe du sujet fut administré 4 semaines après le début de l'entraînement en électrostimulation.

Le test intermédiaire utilisa un protocole identique au pré-test (2.5.2), Ces mesures concernent les deux jambes du sujet.

#### 2.5.5 Post-test

Un post test fut administré neuf semaines après le début de l'entraînement (2-7 jours après la dernière séance d'entraînement par électrostimulation). Le post-test utilisa un protocole en tout point identique au pré-test (2.5.2).

#### 2.6 Analyse statistique

L'analyse des données s'est faite d'abord de façon descriptive par le calcul des moyennes de force obtenu dans chaque groupe et par le calcul de l'écart type. Le gain de force de chaque type de contraction et le gain de volume pour la circonférence fut aussi calculé en % de différence entre la force ou le volume actuel (post-test) par rapport à la force ou au volume d'origine (pré-test).

Le modèle factoriel bloc réduit (FBR-gt) fut utilisé pour déterminer si les résultats de gain de force étaient significatifs pour chaque groupe et chaque jambe. L'intervalle de confiance choisi fut de 95 %.

## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET ANALYSES

#### 3.1 Rappel des hypothèses de la recherche et de la méthode utilisée

Le but de la recherche est d'observer si un entraînement en électrostimulation de 8 semaines peut provoquer un gain en force et en volume. Notre hypothèse de départ est qu'un accroissement de la force et du volume de la jambe sera observable sur le groupe de sujets ayant subi les 8 semaines d'entraînement.

L'expérience avait comme sujet cible des personnes ayant subi une rupture du tendon d'Achille pour observer si l'électrostimulation de la jambe blessée pouvait contribuer, parallèlement à un suivi en thérapie sportive à accroître sa force et son volume comparativement à la thérapie employée seule. Aucun sujet ayant subi la rupture du tendon n'a été en mesure de poursuivre l'expérimentation dans les délais du projet de recherche (1 sujet à été recruté et n'a pas terminé l'étude).

Le protocole d'entraînement a donc été expérimenté avec des sujets «sains». Huit sujets ont participé à la recherche. Cinq furent dans le groupe expérimental et subirent un pré-test, 4 semaines d'entraînement en électrostimulation, un test intermédiaire, 4 semaines d'entraînement en électrostimulation et un post-test. Trois furent dans le groupe témoin et subirent un pré-test, 4 semaines de «repos», un test intermédiaire, 4 semaines de «repos» et un post test.

Le pré-test, le test intermédiaire et le post test furent constitué d'une série de tests identiques mesurant la force et le volume de la jambe des sujets et furent identiques pour le groupe expérimental et pour le groupe témoin.

### 3.2 Résultats et analyses

Les résultats sont présentés ici de façon à vérifier notre hypothèse de recherche. Nous avons regroupé les résultats sous forme de tableaux en regroupant les mesures de force concentriques recueillies lors du pré-test du test intermédiaire et du post-test. Nous avons inclus les mesures de force du groupe expérimental et du groupe témoin dans chaque tableaux et séparer les mesures de la jambe entraîné et de la jambe non-entraînée. Pour le groupe témoin, comme aucune jambe ne fut entraînée nous avons simplement séparé les mesures de force de la jambe droite et celle de la jambe gauche. Nous avons procédé de la même façon pour présenter les résultats de force excentrique et isométrique. Lorsqu'aucun résultats ne figure dans le tableau, c'est que le sujet à arrêter l'expérimentation et que les données subséquentes n'ont pas pu être recueillies. Les mêmes procédures furent employées pour présenter les mesures de volume. Un texte explicatif des tableaux est suivi pour chacun des tableaux présentés.

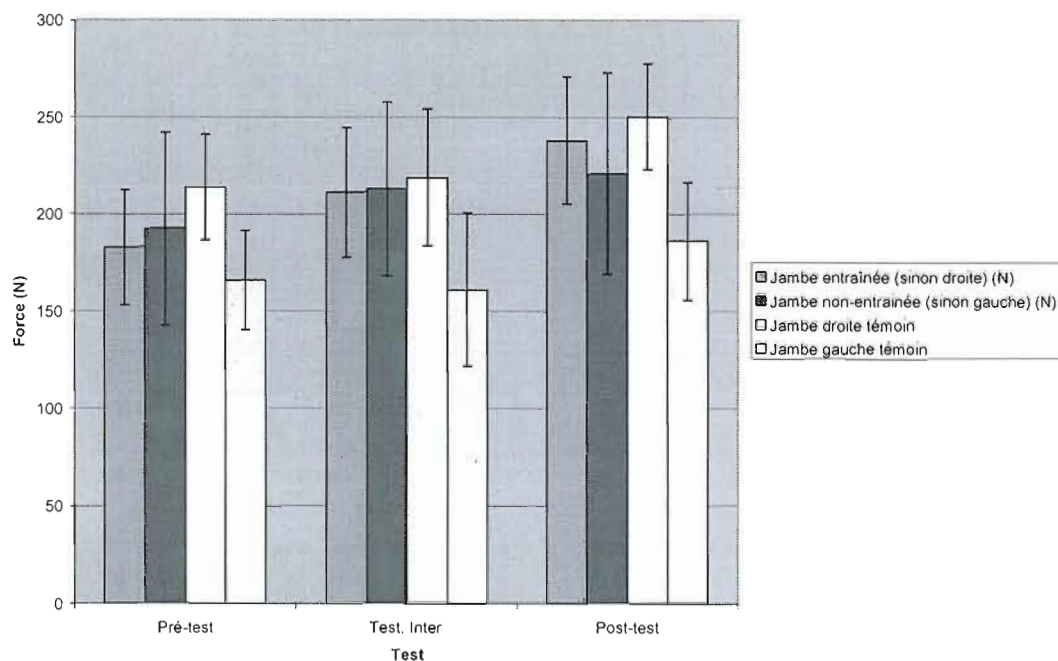
#### 3.2.1 Résultats des mesures de force concentrique

Tableau 3.1: Évolution de la force concentrique de la jambe

Groupe	Sujet	Jambe entraînée (sinon droite) (N)			Jambe non-entraînée (sinon gauche) (N)		
		Pré-test	Test. Inter.	Post-test	Pré-test	Test Inter.	Post-Test
Expérimental	1	179	176	237	179	183	166
		196	189	209	190	183	160
		189	206	221	190	158	193
		162	228	219	125	160	168
	3	165	214	216	126	164	166
		166	233	227	129	139	150
		217	259	285	270	263	253
	4	230	236	303	272	212	236
		251	265	298	285	269	223
		149	157	250	195	260	246
		162	172	247	187	263	229
	5	157	164	227	191	253	239
		105	.	.	217	.	.
	6	127	.	.	214	.	.
145		.	.	217	.	.	
7	156	211	195	167	228	274	
	184	231	226	185	236	315	
	182	230	213	197	223	297	
	Moyenne	183	211	238	193	213	221
Écart type	30	34	33	50	45	52	
Témoin	2	216	243	256	172	207	207
		214	213	272	205	218	198
		241	239	276	201	216	214
		186	200	256	174	134	207
	8	185	190	272	157	132	198
		172	158	276	170	135	214
		226	204	210	142	143	153
	9	249	272	219	139	132	141
		237	252	218	136	134	146
	Moyenne	214	219	251	166	161	186
Écart type	27	35	27	25	40	31	



Graphique 3.1: Évolution de la force concentrique de la jambe



Le tableau de la page précédente montre l'évolution de la force concentrique des sujets du groupe expérimental et témoin lors de leur pré-test, test-intermédiaire et post-test. Le tableau est divisé en quatre sections séparant les ainsi les groupes (expérimental, témoin) et les jambes (entraînées, non entraînée pour le groupe expérimental et droite, gauche pour le groupe témoin). Les résultats des pré-tests, des tests intermédiaires et des post-tests apparaissent dans chacune des sections. Les trois chiffres représentent la moyenne de la force déployée par les fléchisseurs plantaires, en Newton, lors du mouvement de flexion plantaire sur le Kin-Com.

Les résultats du pré-test, du test intermédiaire et du post test de la jambe entraînée du groupe expérimental est d'abord présenté dans la section supérieure gauche du tableau. La force moyenne de la jambe entraînée du groupe expérimental fut de 183 N avec un écart type de 30 N lors du pré-test, de 211 N avec un écart type de 34 N lors du test intermédiaire et de 238 N avec un écart type de 33 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de 30 % par rapport à la force d'origine.

Les résultats dans la section supérieure droite représente le pré-test, le test intermédiaire et le post-test de la jambe non-entraînée du groupe expérimental. La force moyenne de la jambe non-entraînée du groupe expérimental fut de 193 N avec un écart type de 50 N lors du pré-test, de 213 N avec un écart type de 45 N lors du test intermédiaire et de 221 N avec un écart type de 52 N lors du post-test. Ces données représentent un gain de force de 16 % par rapport à la force d'origine.

Les résultats dans la section inférieure gauche représentent les tests de la jambe droite du groupe témoin. La force moyenne de la jambe droite du groupe témoin fut de 214 N avec un écart type de 27 N lors du pré-test, de 219 N avec un écart type de 35 N lors du test intermédiaire et de 251 N avec un écart type de 27 N lors du post-test. Ces données représentent un gain de force de 20 % par rapport à la force d'origine.

Les résultats dans la section inférieure droite représentent les tests de la jambe gauche du groupe témoin. La force moyenne de la jambe gauche du groupe témoin fut de 166 N avec un écart type de 25 N lors du post test, de 161 N avec un écart type de 40 N lors du test intermédiaire et de 186 N avec un écart type de 31 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de 11 % par rapport à la force d'origine.

### 3.2.2 Analyse du gain en force concentrique

L'analyse de la force concentrique s'est fait avec l'aide du logiciel SPSS avec l'aide du modèle factoriel bloc réduit (FBR-gt). Nous avons établi l'intervalle de confiance à 95 %.

Tableau 3.2: Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force concentrique

Sources	Somme des carrés d'écart	Degré de liberté	Carré moyen	F	p
<b>Test</b>	<b>28598,24</b>	<b>2</b>	<b>14299,12</b>	<b>19,24</b>	<b>0,00</b>
Test*Groupe	3360,51	2	1680,26	2,26	0,12
<b>Côté</b>	<b>28974,04</b>	<b>1</b>	<b>28974,04</b>	<b>15,70</b>	<b>0,00</b>
<b>Côté*Groupe</b>	<b>25071,70</b>	<b>1</b>	<b>25071,70</b>	<b>13,58</b>	<b>0,00</b>
<b>Test*Côté</b>	<b>2631,63</b>	<b>2</b>	<b>1459,45</b>	<b>2,03</b>	<b>0,15</b>
Test*Côté*Groupe	249,30	2	138,26	0,19	0,80
Groupe	3559,97	1	3559,97	0,87	0,36

L'analyse de la variance nous indique que le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) à un effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) et le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le

groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test), le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental ) et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

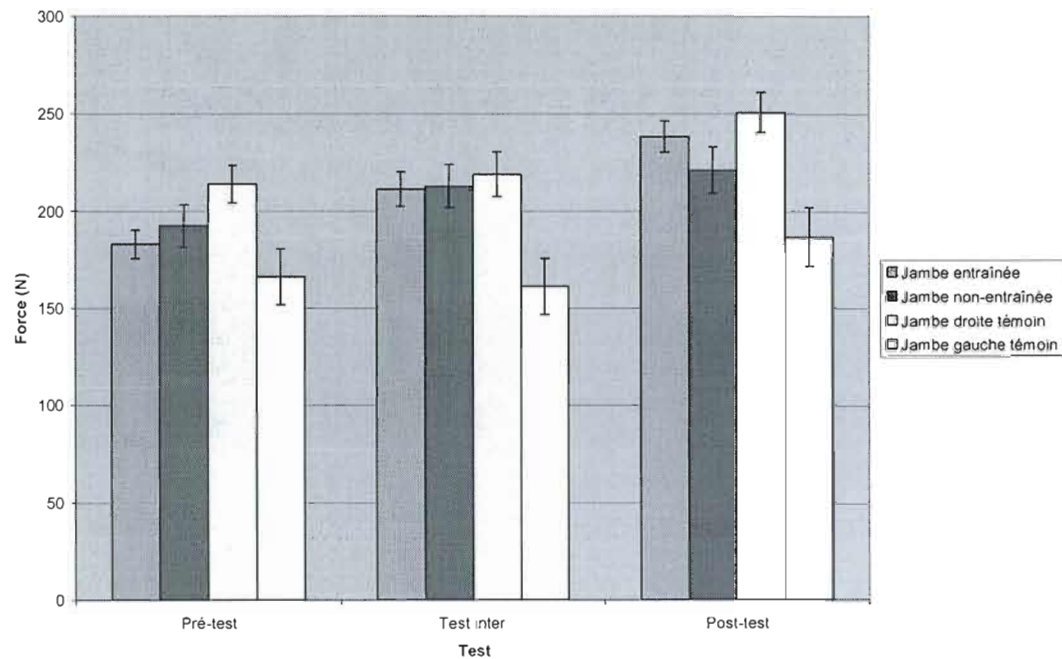
L'analyse de la variance nous indique que le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force concentrique de la jambe.

Tableau 3.3 : Synthèse des différences significatives du gain en force concentrique entre les groupes, les tests et les côtés

Groupe	Test	Côté	Moyenne	Erreur type	Intervalle de confiance de 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Expérimental	1	<b>1</b>	<b>183,000</b>	<b>7,444</b>	<b>167,561</b>	<b>198,439</b>
		2	192,533	11,010	169,700	215,366
		1	211,400	8,846	193,054	229,746
	2	2	212,933	11,125	189,862	236,005
		<b>1</b>	<b>238,200</b>	<b>7,990</b>	<b>221,629</b>	<b>254,771</b>
		3	221,000	11,748	196,637	245,363
Témoin	1	1	214,000	9,611	194,069	233,931
		2	166,222	14,214	136,745	195,699
		1	219,000	11,420	195,316	242,684
	2	2	161,222	14,362	131,437	191,007
		1	250,556	10,315	229,163	271,948
		3	186,444	15,166	154,992	217,897

Les nombres en caractère gras indiquent les différences significatives par rapport aux groupes, aux tests et à la jambe opposée (le côté 1 expérimental représente la jambe entraînée).

Graphique 3.2: Analyse du gain en force concentrique



Pour la jambe entraînée du groupe expérimental, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 183 N, 211 N et 238 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 168 N et 198 N pour le pré-test et entre 193 N et 230 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 193 N et 230 N pour le test intermédiaire et entre 221 N et 255 N pour le post test). Finalement, le gain de force est significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 168 N et 198 N pour le pré-test et entre 221 N et 255 N pour le post test).

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, on observe également un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 193 N, 213 N et 221 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 170 N et 215 N pour le pré-test et entre 190 N et 236 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test

(intervalle de confiance entre 190 N et 236 N pour le test intermédiaire et entre 197 N et 245 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 170 N et 215 N pour le pré-test et entre 197 N et 245 N pour le post test).

Pour la jambe droite du groupe témoin, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 215 N, 219 N et 251 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 194 N et 234 N pour le pré-test et entre 195 N et 243 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 195 N et 243 N pour le test intermédiaire et entre 229 N et 272 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 194 N et 234 N pour le pré-test et entre 229 N et 272 N pour le post test).

Pour la jambe gauche du groupe témoin, on observe une perte de force entre le pré-test et le test intermédiaire et un gain entre le test intermédiaire et le post test résultant en un gain de force entre le pré test et le post-test (respectivement 166 N, 161 N et 186 N). Cependant, la perte de force n'est pas statistiquement significative entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 137 N et 196 N pour le pré-test et entre 131 N et 191 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 131 N et 191 N pour le test intermédiaire et entre 155 N et 218 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 137 N et 196 N pour le pré-test et entre 155 N et 218 N pour le post test).

Pour la force concentrique de la jambe droite (ou de la jambe entraînée) lors du pré test, l'analyse de la variance permet d'affirmer que la variance des résultats la jambe entraînée sont statistiquement équivalant à la variance des résultats de la jambe droite du groupe témoin. Il est donc possible d'affirmer que statistiquement les résultats de départ proviennent de la même population pour les deux groupes.

Pour la force concentrique de la jambe gauche lors du pré test, l'analyse de la variance permet d'affirmer que la variance des résultats la jambe entraînée est statistiquement différente de la variance des résultats de la jambe gauche du groupe témoin. Il n'est donc pas possible d'affirmer que statistiquement les résultats de départ proviennent de la même population pour les deux groupes.

Pour la force concentrique de la jambe entraînée lors du test intermédiaire, l'analyse de la variance permet d'affirmer que la variance des résultats la jambe entraînée est statistiquement différente de la variance des résultats de la jambe gauche du groupe témoin. Il n'est donc pas possible d'affirmer que statistiquement les résultats proviennent de la même population pour les deux groupes.

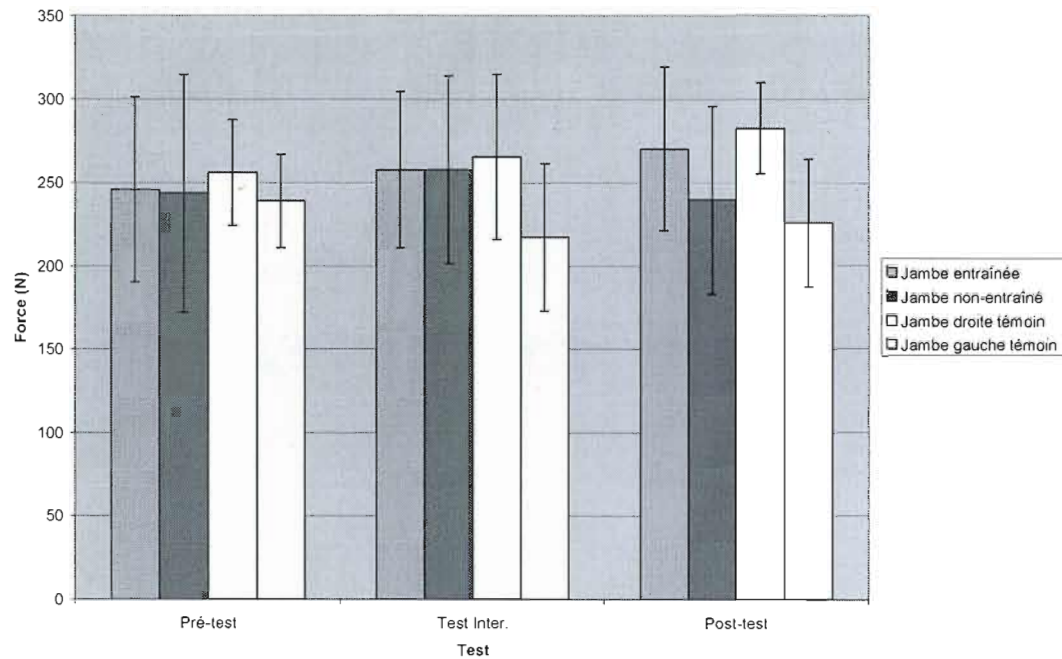
### 3.2.3 Résultats des mesures de force excentrique

Tableau 3.4: Évolution de la force excentrique de la jambe

Groupe	Sujet	Jambe entraînée (sinon droite) (N)			Jambe non-entraînée (sinon gauche) (N)		
		Pré-test	Test Inter.	Post-test	Pré-test	Test Inter.	Post-test
Expérimental	1	234	179	255	208	187	153
		251	232	245	211	188	161
		230	238	247	219	189	195
		178	299	227	153	204	194
		173	277	226	148	212	203
	3	172	284	214	159	197	187
		357	319	327	379	342	270
		323	355	346	318	350	224
	4	331	286	349	383	281	232
		221	213	312	237	286	276
		227	213	309	231	292	286
	5	232	210	309	241	291	269
		153			211		
	6	149			196		
154				209			
241		255	235	251	273	300	
7	269	238	242	253	290	331	
	247	266	212	261	281	313	
	Moyenne	246	258	270	243	258	240
	Écart type	55	47	49	71	56	57
Témoin	2	248	260	267	233	249	237
		251	250	291	238	259	230
		248	260	272	244	259	226
		220	217	264	209	150	194
		236	223	260	209	165	167
	8	217	201	258	205	167	180
		297	324	331	277	232	261
		305	334	324	258	222	269
	9	283	320	279	277	252	270
		Moyenne	256	265	283	239	217
		Écart type	32	50	27	28	44



Graphique 3.3: Évolution de la force excentrique de la jambe



Le tableau 3.3 est séparé de la même façon que le tableau 3.1 expliqué précédemment. Les résultats présentés ici montrent l'évolution de la force excentrique de la jambe lors du mouvement de flexion plantaire.

Pour la jambe entraînée du groupe expérimental la moyenne de force fut de 246 N avec un écart type de 55 N lors du pré-test, de 258 N avec un écart type de 47 N lors du test intermédiaire et de 270 N avec un écart type de 49 N lors du post-test. Ces données représentent un gain de force de 13 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, la moyenne de force fut de 243 N avec un écart type de 71 N lors du pré test, de 258 N avec un écart type de 56 N lors du test intermédiaire et de 240 N avec un écart type de 57 N pour le post test. Ces données représentent un gain de force de -2 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe droite du groupe témoin la moyenne de force fut de 256 N avec un écart type de 32 N lors du pré-test, de 265 N avec un écart type de 50 N lors du test intermédiaire et de 283 N avec un écart type de 27 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de 15 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe gauche du groupe témoin la moyenne de force fut de 239 N avec un écart type de 28 N lors du pré-test, de 217 N avec un écart type de 44 N lors du test intermédiaire et de 226 N avec un écart type de 38 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de -7 % par rapport à la force d'origine.

### 3.2.4 Analyse du gain en force excentrique

L'analyse de la force excentrique à été effectuée exactement de la même façon que la procédure décrite à la section 3.2.2.

Tableau 3.5: Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force excentrique

Sources	Somme des carrés d'écart	Degré de liberté	Carré moyen	F	p
Test	1711,49	2,00	855,75	0,70	0,50
Test*Groupe	2342,38	2,00	1171,19	0,95	0,39
<b>Côté</b>	<b>22639,84</b>	<b>1,00</b>	<b>22639,84</b>	<b>15,43</b>	<b>0,00</b>
<b>Côté*Groupe</b>	<b>7470,50</b>	<b>1,00</b>	<b>7470,50</b>	<b>5,09</b>	<b>0,03</b>
<b>Test*Côté</b>	<b>6580,03</b>	<b>1,86</b>	<b>3533,43</b>	<b>3,76</b>	<b>0,03</b>
Test*Côté*Groupe	1604,70	1,86	861,71	0,92	0,40
Groupe	719,91	1,00	719,91	0,08	0,79

L'analyse de la variance nous indique que le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) n'a pas d'effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une

jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) et le groupe (expérimental,-rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) et le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

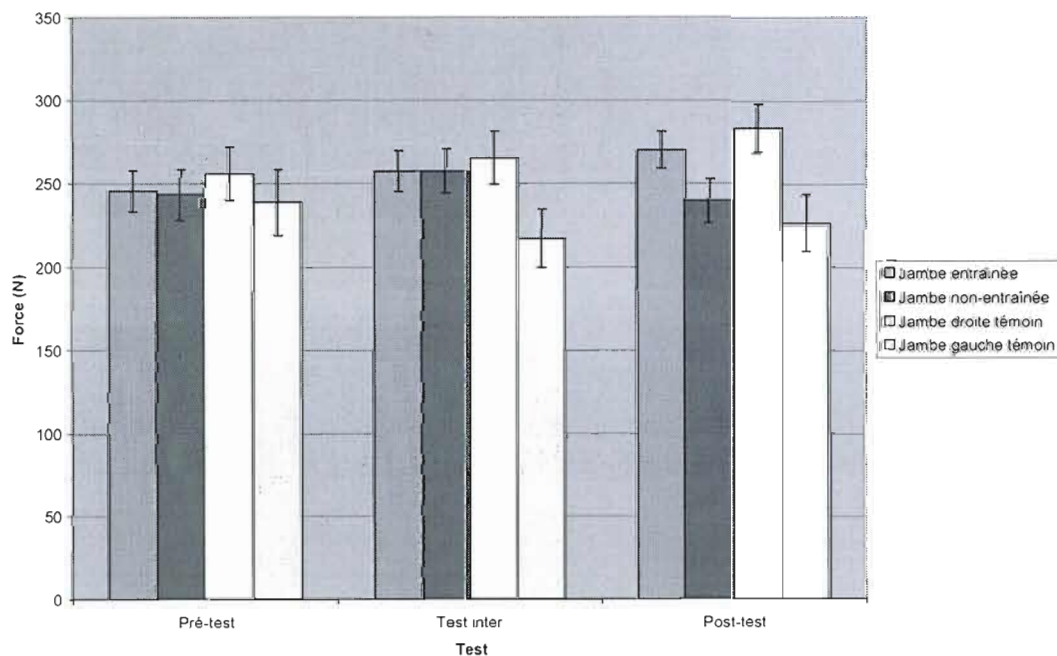
L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test), le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental ) et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force excentrique de la jambe.

Tableau 3.6 : Synthèse des différences significatives du gain en force excentrique entre les groupes, les tests et les côtés

Groupe	Test	Côté	Moyenne	Erreur type	Intervalle de confiance de 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Expérimental	1	1	245,733	12,462	219,890	271,577
		2	243,467	15,341	211,652	275,282
	2	1	257,600	12,368	231,951	283,249
		2	257,533	13,487	229,563	285,504
	3	1	270,333	10,968	247,586	293,080
		2	239,600	13,094	212,445	266,755
Témoin	1	1	256,111	16,088	222,747	289,475
		2	238,889	19,805	197,816	279,962
	2	1	265,444	15,967	232,331	298,558
		2	217,222	17,412	181,113	253,332
	3	1	282,889	14,160	253,523	312,255
		2	226,000	16,904	190,943	261,057

Graphique 3.4: Analyse du gain en force excentrique



Pour la jambe entraînée du groupe expérimental, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 246 N, 258 N et 270 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 220 N et 272 N pour le pré-test et entre 232 N et 283 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 232 N et 283 N pour le test intermédiaire et entre 248 N et 293 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 220 N et 272 N pour le pré-test et entre 248 N et 293 N pour le post test).

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre une perte de force entre le test intermédiaire et le post test résultant en une perte de force entre le pré-test et le post-test (respectivement 243 N, 258 N et 240 N). Le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 212 N et 275 N pour le pré-test et entre 230 N et 286 N pour le test intermédiaire). Aussi, la perte de force n'est pas significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 230 N et 286 N pour le test intermédiaire et entre 212 N et 267 N pour le post test). Finalement, la perte de force n'est pas significative entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 212 N et 275 N pour le pré-test et entre 212 N et 267 N pour le post test).

Pour la jambe droite du groupe témoin, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 256 N, 265 N et 283 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 223 N et 289 N pour le pré-test et entre 232 N et 299 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 232 N et 299 N pour le test intermédiaire et entre 254 N et 312 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 223 N et 289 N pour le pré-test et entre 254 N et 312 N pour le post test).

Pour la jambe gauche du groupe témoin, on observe une perte de force entre le pré-test et le test intermédiaire et un gain entre le test intermédiaire et le post test résultant en une perte de force entre le pré test et le post-test (respectivement 239 N, 217 N et 226 N). Cependant, la perte de force n'est pas statistiquement significative entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 198 N et 280 N pour le pré-test et entre 181 N et 253 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 181 N et 253 N pour le test intermédiaire et entre 191 N et 261 N pour le post test). Finalement, la perte de force n'est pas significative entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 198 N et 280 N pour le pré-test et entre 191 N et 261 N pour le post test).

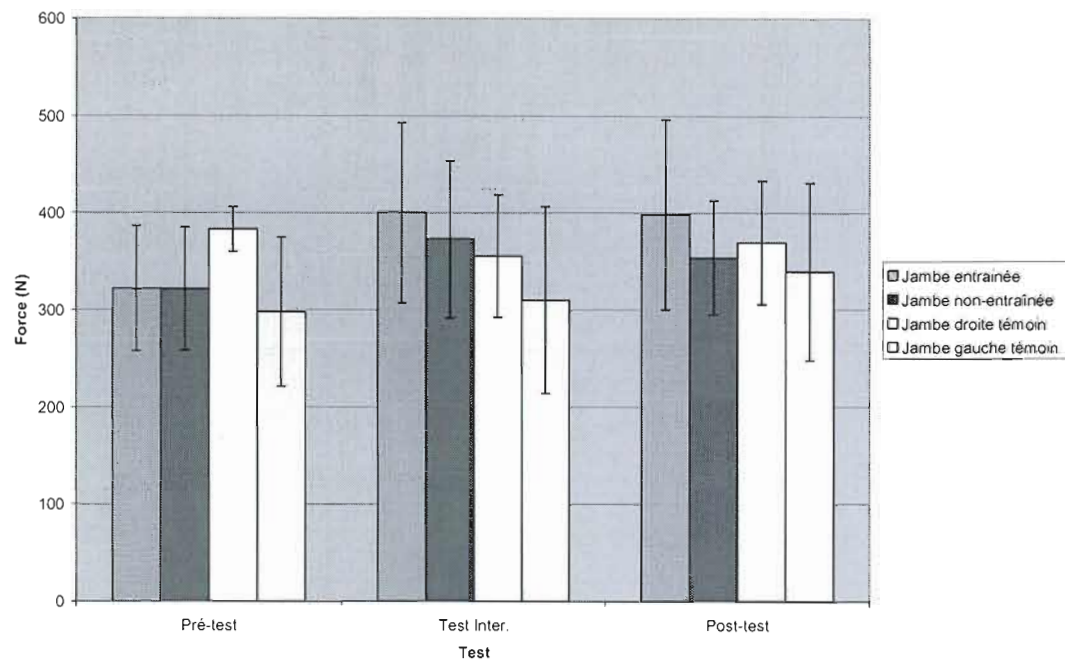
### 3.2.5 Résultats des mesures de force isométrique

Les nombres en italique indiquent la moyenne des autres essais (essai manqué).

Tableau 3.7: Évolution de la force isométrique de la jambe

Groupe	Sujet	Jambe entraînée (sinon droite) (N)			Jambe non-entraînée (sinon gauche) (N)		
		Pré-test	Test Inter.	Post-test	Pré-test	Test Inter.	Post-test
Expérimental	1	276	325	360	358	238	381
		330	328	359	349	306	352
		318	357	395	326	360	354
		239	371	291	214	290	249
	3	217	380	310	189	293	266
		201	358	299	218	281	297
		391	579	566	338	560	346
	4	409	551	568	338	438	386
		400	515	585	338	395	330
		346	325	432	347	404	355
	5	320	303	400	334	384	329
		303	277	361	323	382	340
		223	.	.	271	.	.
	6	254	.	.	279	.	.
270		.	.	262	.	.	
363		459	383	408	436	459	
7	366	444	329	361	413	429	
	352	435	343	385	410	436	
	Moyenne	322	400	399	322	373	354
	Écart type	65	93	98	64	81	59
Témoin	2	390	378	359	375	434	423
		365	379	372	362	428	426
		367	379	365	386	401	427
		382	277	299	202	192	223
	8	409	281	289	216	202	225
		413	283	308	215	205	221
		345	354	444	292	309	343
	9	405	421	449	371	305	399
		372	450	443	264	318	371
		Moyenne	383	356	370	298	310
		Écart type	23	63	64	77	96

Graphique 3.5: Évolution de la force isométrique de la jambe



Le tableau 3.7 est séparé de la même façon que les tableaux 3.1 et 3.4 expliqués précédemment. Les résultats présentés ici montrent l'évolution de la force isométrique de la jambe lors du mouvement de flexion plantaire.

Les chiffres présentés en gras représentent des essais qui ont été complètement raté par le sujet lors de l'expérimentation. Afin de ne pas faussé les données, nous avons remplacé le résultat par la moyenne des autres essais réussis.

Pour la jambe entraînée du groupe expérimental la moyenne de force fut de 322 N avec un écart type de 65 N lors du pré-test, de 400 N avec un écart type de 93 N lors du test intermédiaire et de 399 N avec un écart type de 98 N lors du post-test. Ces données représentent un gain de force de 42 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, la moyenne de force fut de 322 N avec un écart type de 64 N lors du pré test, de 373 N avec un écart type de 81 N lors du test



intermédiaire et de 354 N avec un écart type de 59 N pour le post test. Ces données représentent un gain de force de 18 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe droite du groupe témoin la moyenne de force fut de 383 N avec un écart type de 23 N lors du pré-test, de 356 N avec un écart type de 63 N lors du test intermédiaire et de 370 N avec un écart type de 64 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de -7 % par rapport à la force d'origine.

Pour la jambe gauche du groupe témoin la moyenne de force fut de 298 N avec un écart type de 77 N lors du pré-test, de 310 N avec un écart type de 96 N lors du test intermédiaire et de 340 N avec un écart type de 92 N lors du post test. Ces données représentent un gain de force de 23 % par rapport à la force d'origine.

### 3.2.6 Analyse du gain en force isométrique

L'analyse de la force isométrique a été effectuée exactement de la même façon que la procédure décrite à la section 3.2.2.

Tableau 3.8: Analyse de la variance intra et inter groupes pour la force isométrique

Sources	Somme des carrés d'écart	Degré de liberté	Carré moyen	F	p
<b>Test</b>	<b>30392,66</b>	<b>1,70</b>	<b>17832,02</b>	<b>6,69</b>	<b>0,00</b>
<b>Test*Groupe</b>	<b>29426,41</b>	<b>1,70</b>	<b>17265,10</b>	<b>6,47</b>	<b>0,01</b>
<b>Côté</b>	<b>51012,50</b>	<b>1,00</b>	<b>51012,50</b>	<b>8,91</b>	<b>0,01</b>
Côté*Groupe	7161,34	1,00	7161,34	1,25	0,28
Test*Côté	246,16	1,90	129,32	0,08	0,92
<b>Test*Côté*Groupe</b>	<b>14480,58</b>	<b>1,90</b>	<b>7607,35</b>	<b>4,60</b>	<b>0,02</b>
Groupe	11886,34	1,00	11886,34	0,55	0,47

L'analyse de la variance nous indique que le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) a un d'effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) et le groupe (expérimental,-rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) et le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) n'a pas d'effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test), le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental ) et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

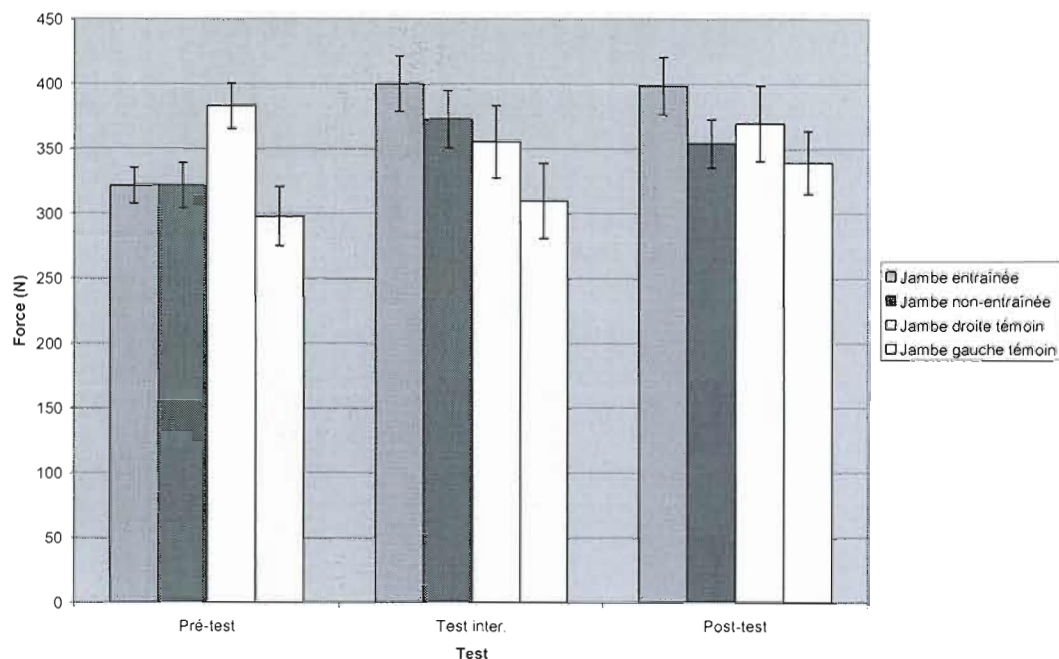
L'analyse de la variance nous indique que le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la force isométrique de la jambe.

Tableau 3.9 : Analyse des différences significatives du gain en force isométrique entre les groupes, les tests et les côtés

Groupe	Test	Côté	Moyenne	Erreur standard	Intervalle de confiance de 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Expérimental	1	<b>1</b>	<b>322,067</b>	<b>13,804</b>	<b>293,440</b>	<b>350,694</b>
		2	321,733	17,731	284,961	358,506
	2	<b>1</b>	<b>400,467</b>	<b>21,485</b>	<b>355,909</b>	<b>445,024</b>
		2	372,667	22,475	326,056	419,278
		<b>1</b>	<b>398,733</b>	<b>22,512</b>	<b>352,047</b>	<b>445,419</b>
3	2	353,933	18,748	315,052	392,814	
Témoin	1	1	383,111	17,82	346,154	420,068
		2	298,111	22,891	250,638	345,584
	2	1	355,778	27,737	298,254	413,302
		2	310,444	29,015	250,27	370,619
	3	1	369,778	29,062	309,506	430,049
		2	339,778	24,204	289,583	389,973

Les nombres en caractère gras indiquent les différences significatives par rapport aux groupes, aux tests et à la jambe opposée (le côté 1 expérimental représente la jambe entraînée).

Graphique 3.6: Analyse du gain en force isométrique



Pour la jambe entraînée du groupe expérimental, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et une stabilité (ou baisse minime) entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 322 N, 400 N et 399 N). Aussi, le gain de force est statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 293 N et 350 N pour le pré-test et entre 356 N et 445 N pour le test intermédiaire). La minime perte de force n'est pas significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 356 N et 445 N pour le test intermédiaire et entre 352 N et 445 N pour le post test). Finalement, le gain de force est significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 293 N et 350 N pour le pré-test et entre 352 N et 445 N pour le post test).

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et une perte de force entre le test intermédiaire et le post test résultant en un gain de force entre le pré-test et le post-test (respectivement 322 N, 373 N et 354 N). Le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 285 N et 359 N pour le pré-test et entre 326 N et 419 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test

intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 326 N et 419 N pour le test intermédiaire et entre 315 N et 393 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 285 N et 359 N pour le pré-test et entre 315 N et 393 N pour le post test).

Pour la jambe droite du groupe témoin, on observe une perte de force entre le pré-test et le test intermédiaire et un gain de force entre le test intermédiaire et le post test résultant en une perte de force entre le pré-test et le post-test (respectivement 383 N, 356 N et 370 N). Cependant, la perte de force n'est pas statistiquement significative entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 346 N et 420 N pour le pré-test et entre 298 N et 413 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 298 N et 413 N pour le test intermédiaire et entre 310 N et 430 N pour le post test). Finalement, la perte de force n'est pas significative entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 346 N et 420 N pour le pré-test et entre 310 N et 430 N pour le post test).

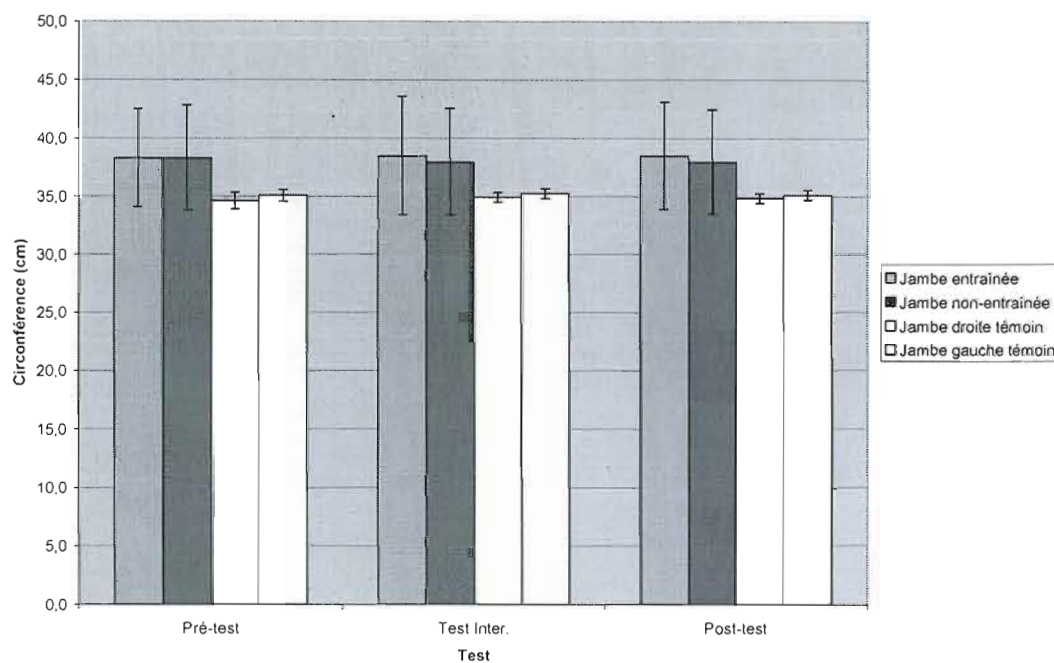
Pour la jambe gauche du groupe témoin, on observe un gain de force entre le pré-test et le test intermédiaire et entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 298 N, 310 N et 340 N). Cependant, le gain de force n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 251 N et 346 N pour le pré-test et entre 250 N et 371 N pour le test intermédiaire). Aussi, le gain de force n'est pas significatif entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 250 N et 371 N pour le test intermédiaire et entre 290 N et 390 N pour le post test). Finalement, le gain de force n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 251 N et 346 N pour le pré-test et entre 290 N et 390 N pour le post test).

### 3.2.7 Résultats des mesures de volume

Tableau 3.10: Évolution de la circonférence de la jambe

Groupe	Sujet	Jambe entraînée (sinon droite) (cm)			Jambe non-entraînée (sinon gauche) (cm)		
		Pré-test	Test Inter.	Post-test	Pré-test	Test Inter.	Post-test
Expérimental	1	36,1	36,5	37,0	36,2	36,2	36,0
		36,5	36,6	37,0	35,5	36,0	36,1
		36,4	37,0	37,0	35,8	35,9	36,6
		36,1	35,5	35,6	35,5	35,5	34,9
		36,6	35,6	35,6	35,7	35,5	34,9
	3	36,6	35,6	35,6	35,6	35,5	34,9
		46,1	48,3	47,4	46,8	46,6	46,4
		46,3	48,2	47,3	47,0	47,0	46,5
	4	46,6	48,3	47,3	46,9	46,8	46,6
		36,7	36,5	36,6	37,5	36,1	36,5
		36,1	36,5	36,5	37,1	36,2	36,6
	5	36,7	36,6	36,5	37,1	36,3	36,6
		35,9	.	.	37,2	.	.
		35,4	.	.	37,1	.	.
6	35,5	.	.	37,0	.	.	
	35,6	35,5	36,1	35,6	35,2	35,5	
	35,7	35,1	36,0	35,7	35,4	35,5	
7	35,8	35,4	36,1	35,9	35,2	35,6	
	Moyenne	38,3	38,5	38,5	38,3	38,0	37,9
	Écart type	4,2	5,1	4,6	4,5	4,6	4,5
Témoin	2	34,1	35,0	34,4	35,0	35,5	34,6
		34,3	34,9	34,8	35,0	35,5	34,9
		34,5	34,8	34,5	35,0	35,6	34,9
		33,8	34,6	34,7	34,6	34,7	34,8
		34,3	34,5	34,5	34,5	34,6	35,0
	8	34,0	34,4	34,6	34,5	34,7	34,9
		35,4	35,3	35,2	35,6	35,6	35,6
		35,6	35,5	35,5	35,7	35,5	35,8
	9	35,6	35,4	35,4	35,8	35,6	35,7
		Moyenne	34,6	34,9	34,8	35,1	35,3
		Écart type	0,7	0,4	0,4	0,5	0,4

Graphique 3.7: Évolution de la circonférence de la jambe



Le tableau 3.10 est séparé de la même façon que les tableaux 3.1, 3.4 et 3.7 expliqués précédemment. Les résultats présentés ici montrent l'évolution de la circonférence de la jambe au niveau du ventre des gastrocnémiens lorsque le sujet est en position debout.

Pour la jambe entraînée du groupe expérimental la moyenne de circonférence fut de 38,3 cm avec un écart type de 4,2 cm lors du pré-test, de 38,5 cm avec un écart type de 5,1 cm lors du test intermédiaire et de 38,5 cm avec un écart type de 4,6 cm lors du post-test. Ces données représentent un gain de volume de 0 % par rapport au volume d'origine.

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, la moyenne de force fut de 38,3 cm avec un écart type de 4,5 cm lors du pré test, de 38,0 cm avec un écart type de 4,6 cm lors du test intermédiaire et de 37,9 cm avec un écart type de 4,5 cm pour le post test. Ces données représentent un gain de volume de 0 % par rapport au volume d'origine.

Pour la jambe droite du groupe témoin la moyenne de force fut de 34,6 cm avec un écart type de 0,7 cm lors du pré-test, de 34,9 cm avec un écart type de 0,4 cm lors du test intermédiaire et de 34,8 cm avec un écart type de 0,4 cm lors du post test. Ces données représentent un gain de volume de 0 % par rapport au volume d'origine.

Pour la jambe gauche du groupe témoin la moyenne de force fut de 35,1 cm avec un écart type de 0,5 cm lors du pré-test, de 35,3 cm avec un écart type de 0,4 cm lors du test intermédiaire et de 35,1 cm avec un écart type de 0,4 cm lors du post test. Ces données représentent un gain de volume de 0 % par rapport au volume d'origine.

### 3.2.8 Analyse du gain en volume

L'analyse du gain en volume à été effectuée exactement de la même façon que la procédure décrite à la section 3.2.2.

Tableau 3.11: Analyse de la variance intra et inter groupes pour la circonférence

Sources	Somme des carrés d'écart	Degré de liberté	Carré moyen	F	p
Test	0,24	2,00	0,12	0,58	0,56
Test*Groupe	0,46	2,00	0,23	1,14	0,33
Côté	0,00	1,00	0,00	0,00	0,97
<b>Côté*Groupe</b>	<b>4,32</b>	<b>1,00</b>	<b>4,32</b>	<b>37,56</b>	<b>0,00</b>
<b>Test*Côté</b>	<b>0,90</b>	<b>1,51</b>	<b>0,60</b>	<b>4,27</b>	<b>0,03</b>
Test*Côté*Groupe	0,29	1,51	0,19	1,35	0,27
<b>Groupe</b>	<b>358,19</b>	<b>1,00</b>	<b>358,19</b>	<b>4,47</b>	<b>0,05</b>

L'analyse de la variance nous indique que le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) n'a pas d'effet significatif sur la circonférence de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une



jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la circonférence de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) n'a pas d'effet significatif sur la circonférence de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) et le groupe (expérimental, -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la circonférence de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test) et le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental) a un effet significatif sur la circonférence de la jambe.

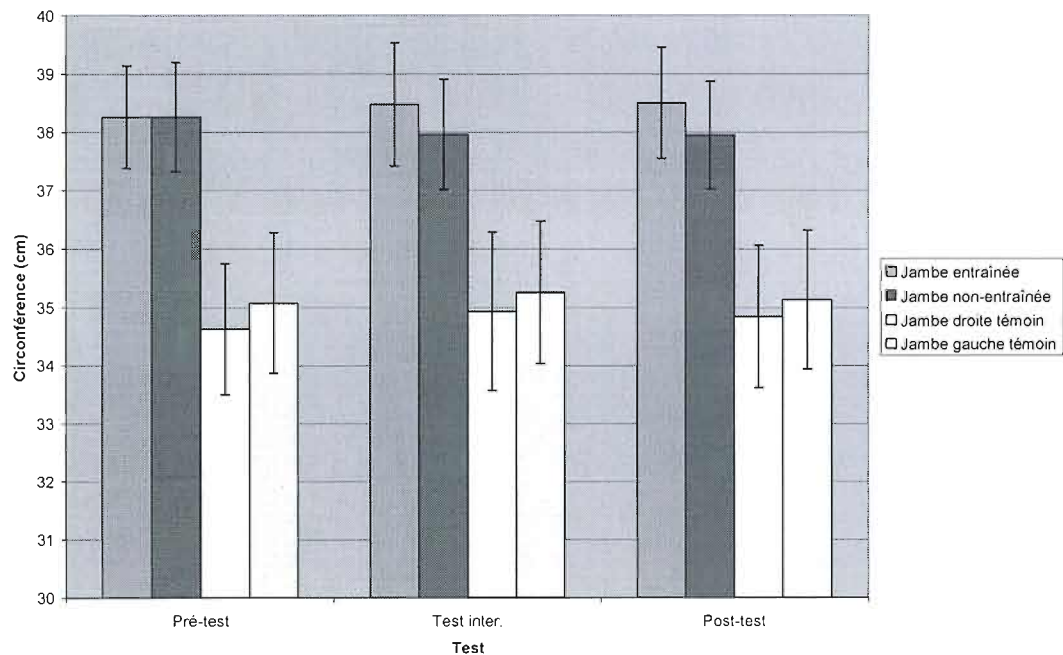
L'analyse de la variance nous indique que l'interaction entre le moment de passation du test (pré test, test intermédiaire ou post test), le côté de la jambe (droit, ou gauche pour le groupe témoin, entraîné (droit) ou non-entraîné (gauche) pour le groupe expérimental ) et le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) n'a pas d'effet significatif sur la circonférence de la jambe.

L'analyse de la variance nous indique que le groupe (expérimental -rappelons que le groupe expérimental est composé d'une jambe entraînée et d'une jambe non-entraînée- ou témoin) a un effet significatif sur la circonférence de la jambe.

Tableau 3.12 : Synthèse des différences significatives de gain en volume entre les groupes, les tests et les côtés

Groupe	Test	Côté	Moyenne	Erreur standard	Intervalle de confiance de 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Expérimental	1	1	38,260	0,871	36,454	40,066
		2	38,260	0,934	36,324	40,196
	2	1	38,480	1,052	36,299	40,661
		2	37,960	0,948	35,994	39,926
	3	1	38,507	0,948	36,540	40,474
		2	37,947	0,923	36,033	39,861
Témoin	1	1	34,622	1,124	32,290	36,954
		2	35,078	1,205	32,578	37,578
	2	1	34,933	1,358	32,118	37,749
		2	35,256	1,224	32,718	37,794
	3	1	34,844	1,224	32,305	37,384
		2	35,133	1,192	32,662	37,604

Graphique 3.8: Analyse du gain en volume



Pour la jambe entraînée du groupe expérimental, on observe un très léger gain de volume entre le pré-test et le test intermédiaire et une stabilité entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 38,3 cm, 38,5 cm et 38,5 cm). Le gain de volume n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 36,5 cm et 40,0 cm pour le pré-test et entre 36,3 cm et 40,7 cm pour le test intermédiaire). Aussi, il n'y a aucune différence significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 36,3 cm et 40,7 cm pour le test intermédiaire et entre 36,5 cm et 40,5 cm pour le post test). Finalement, le gain en volume n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 36,5 cm et 40,0 cm pour le pré-test et entre 36,5 cm et 40,5 cm pour le post test).

Pour la jambe non-entraînée du groupe expérimental, on observe une très légère perte de volume entre le pré-test et le test intermédiaire et une stabilité entre le test intermédiaire et le post test (respectivement 38,3 cm, 38,0 cm et 38,0 cm). La perte de volume n'est pas statistiquement significative entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 36,3 cm et 40,2 cm pour le pré-test et entre 36,0 cm et 40,0 cm pour le test intermédiaire). Aussi, il n'y a aucune différence significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 36,0 cm et 40,0 cm pour le test intermédiaire et entre 36,0 cm et 40,0 cm pour le post test). Finalement, le gain en volume n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 36,3 cm et 40,2 cm pour le pré-test et entre 36,0 cm et 40,0 cm pour le post test).

Pour la jambe droite du groupe témoin, on observe un très léger gain de volume entre le pré-test et le test intermédiaire et une perte minime entre le test intermédiaire et le post test résultant en un gain minime en le pré-test et le post-test (respectivement 34,6 cm, 34,9 cm et 34,8 cm). Le gain de volume n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 32,3 cm et 37,0 cm pour le pré-test et entre 32,1 cm et 37,7 cm pour le test intermédiaire). Aussi, il n'y a aucune différence significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 32,1 cm et 37,7 cm pour le test intermédiaire et entre 32,3 cm et 37,4 cm pour le post test). Finalement, le gain en

volume n'est pas significatif entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 32,3 cm et 37,0 cm pour le pré-test et entre 32,3 cm et 37,4 cm pour le post test).

Pour la jambe gauche du groupe témoin, on observe un très léger gain de volume entre le pré-test et le test intermédiaire et une très légère perte de volume entre le test intermédiaire et le post test résultant en une stabilité de volume entre le pré-test et le post-test (respectivement 35,1 cm, 35,3 cm et 35,1 cm). Le gain de volume n'est pas statistiquement significatif entre le pré-test et le test intermédiaire (intervalle de confiance entre 32,6 cm et 37,6 cm pour le pré-test et entre 32,7 cm et 37,8 cm pour le test intermédiaire). La perte de force n'est pas significative entre le test intermédiaire et le post-test (intervalle de confiance entre 32,7 cm et 37,8 cm pour le test intermédiaire et entre 32,7 cm et 37,6 cm pour le post test). Finalement, il n'y a aucune différence significative de volume entre le pré-test et le post-test (intervalle de confiance entre 32,6 cm et 37,6 cm pour le pré-test et entre 32,7 cm et 37,6 cm pour le post test).

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

#### 4.1 Synthèse des résultats obtenus

Plusieurs études furent effectuées en électrostimulation mais la comparaison entre celles-ci est difficile étant donné la grande variabilité dans les protocoles de stimulation utilisés, les types de stimulateurs utilisés et le groupe de muscle stimulé (Revue de Taillefer, 1996).

Le journal de bord recueillant des données sur le niveau de douleur et le niveau d'activité physique journalier fut employé avec nos sujets même si ceux-ci n'avaient pas subi de rupture du tendon d'Achille. De façon générale, la douleur la plus forte était rapportée après les premiers entraînements pour ensuite être plutôt négligeable.

Aucun de nos sujets entraînés par électrostimulation n'a subi de dommage à la peau après les 8 semaines d'entraînement. Ces faits s'accordent avec les points soulevés en revue par Mannheimer et Lampe, 1984 et Decherchi et al. 2002 stipulant que l'emploi d'un courant biphasique réduisait grandement les risques d'alcalose et d'acidose ainsi que les sensations de brûlure cutanée.

#### 4.2 Discussion sur le gain en force

Les résultats ont montré que des gains de force significatifs lors de contraction maximale concentrique et isométrique ont été provoqués par notre entraînement de 8 semaines en électrostimulation. La jambe non-entraînée et le groupe témoin n'a obtenu aucun

gain significatif consolidant l'idée que le gain de force provient bel et bien des 8 semaines d'entraînement tout comme il fut le cas dans l'étude de Martin et al., 1994 qui a utilisé un protocole similaire au nôtre en stimulant le triceps sural et obtenu lui aussi des gains en force isométrique et concentrique. L'entraînement de Martin et al., s'est déroulé sur 4 semaines plutôt que 8. Plusieurs autres études ont obtenus divers gain de force en employant des protocoles souvent moins long que le nôtre mais avec plus de sujets (Brocherie et al., 2005, Pichon et al., 1995, Maffiuletti et al., 2000, Paillard et al., en 2004 Valli et al. en 2002).

Aussi, le gain en force isométrique est apparu significatif dès la passation du test intermédiaire à la 4<sup>e</sup> semaine alors qu'il a fallut attendre le post-test pour voir un gain significatif pour la force concentrique. L'entraînement s'étant déroulé la jambe tendue dans un angle près de 90° en contraction isométrique explique sûrement le gain plus rapide dans ce type de contraction comparativement aux autres comme il est mentionné dans la revue de Taillefer, 1996, que le gain de force isométrique est plus important dans l'angle où le muscle est stimulé.

Aucun gain en force excentrique ne fut significatif, autant pour le groupe entraîné que pour le groupe témoin. Cependant, nous pensons que l'entraînement par électrostimulation pourrait s'avérer bénéfique dans ce type de contraction également étant donné que les résultats bruts montrent des gains constants de force entre le pré-test, le test intermédiaire et le post-test. Selon nous, un plus grand nombre de sujets ayant participé à l'entraînement ou un entraînement prolongé de quelques semaines aurait sûrement permis d'observer des gains de force lors de contraction excentrique également. Notons que bien que nous n'ayons pas obtenu de gain de force excentrique, nous croyons que cela aurait été possible avec un plus grand échantillon comme ce fut le cas dans l'étude de Maffiuletti, Pensini et Martin, 2002 qui entraînait lui aussi le triceps sural.

Aussi, les résultats que nous avons obtenus montrent des gains non significatifs mais présents de force entre les test que ce soit pour le groupe témoin ou le groupe expérimental allant dans le même ordre d'idée qu'il y a un apprentissage du mouvement de présent, c'est-à-dire que la force du muscle augmente entre les tests par le seul fait de répéter la même série

de test plusieurs fois (revue de Taillefer 1996, revue de Gandevia 2001), et peut-être aussi un effet controlatéral pour la jambe des sujets entraînés, c'est-à-dire que le fait d'entraîner la jambe droite en force augmente la force de la jambe gauche sans que celle-ci ne soit soumise à l'entraînement tel que revu par Portmann, 1991 et Selkowitz, 1989. Rappelons cependant que ces gains ne sont pas comparables à ceux obtenus par l'entraînement en électrostimulation qui eux sont significatifs au niveau concentrique et isométrique. Autrement dit, même s'il y a de façon générale une augmentation de la force pour la majorité des groupes entre les tests, l'augmentation la plus marquée est celle obtenue par les jambes entraînées par électrostimulation.

#### 4.3 Discussion sur le gain en volume

Aucun gain en volume ne fut significatif chez nos sujets qui, rappelons le, n'avait pas subi de rupture du tendon d'Achille au préalable. Les résultats montrent clairement que la circonférence du ventre des gastrocnémiens est demeurée inchangée du pré-test au post-test. Dans le même ordre d'idée, aucun gain de volume n'a été obtenu par Martin et al., 1994 qui employa un protocole similaire au nôtre, mais sur un nombre de semaines moindre que nous. Ce fut également le cas dans les études d'Assadi et Cometti en 1991 et de Martin et Cometti en 1991 et Paillard et al., 2004 qui ont tous testé des périodes d'entraînement moins longues que la nôtre. Ces faits semblent montrer que les mollets sont difficiles à hypertrophier même sur une longue période, peut-être due au fait que nous les utilisons chaque jour pour marcher, donc plus apte à se développer en endurance, provoquant peu d'hypertrophie. Toutefois, il aurait été intéressant d'observer l'issue de notre protocole chez des personnes ayant subi une rupture du tendon d'Achille où il est bien démontré qu'une atrophie s'est installée. C'est peut-être une des limites de notre étude de ne pas avoir entraîné un muscle n'ayant pas été atrophié au préalable.

Cependant, il est important de mentionner que des changements morphologiques de la jambe ont été observés chez plusieurs sujets ayant subi notre entraînement par électrostimulation et que ces changements ne concernaient que la jambe soumise à l'électrostimulation. Parmi ces changements, notons la forme comme tel du muscle qui

semblait plus «bombé» et l'observation d'une plus grande vascularisation (les veines des muscles entraînés ressortaient beaucoup plus chez un sujet) sur les jambes entraînées des sujets du groupe expérimental. Bien que ces résultats ne furent pas mesurés, ils vont dans le même sens que ceux observés par Vanderthommen et al., 1999 et Cramer et al., 2002, soit une augmentation de la sollicitation métabolique et de la densité capillaire sur le muscle subissant l'électrostimulation. Également nos observations de changements de morphologie vont dans le même sens que Turostowski, Fayolle et Cometti, 1991 qui ont réussi à observer un gain de masse musculaire sur le quadriceps en 3 semaines et des gains de masse musculaire sur le biceps brachial obtenu par Gilet et Cometti en 1990 (Cometti, 1994).

Comme le phénomène de l'hypertrophie concerne principalement les fibres de type II (Antonio et Gonyea, 1993) et qu'en général, la force maximale est obtenue chez l'homme pour des fréquences de stimulation comprise entre 50 et 120 Hz (Duchateau 1992, Fredon, 1994), il serait intéressant d'utiliser une fréquence plus haute que 70 Hz, si le sujet est capable de la tolérer. Cooper et al., 1988 ont clairement montré que la force de contraction du muscle était en lien direct avec sa fréquence de stimulation, alors en provoquant une contraction plus forte nous augmenterons nos chances d'induire une surcharge nécessaire à l'hypertrophie musculaire (Rennie, 2004, Lowe et Alway, 2002).

Néanmoins, même si aucun gain de volume par augmentation de la circonférence au niveau du ventre des gastrocnémiens ne fut observé, il semblerait que l'électrostimulation pourrait apporter des changements intéressants sur la morphologie du muscle entraîné, particulièrement si on cible une clientèle ayant subi une rupture du tendon d'Achille. D'autres recherches sont nécessaires pour documenter cette avenue.

#### 4.4 Limites de l'étude

Lors de la passation des tests, nous avons remarqué que malgré les précautions prises pour s'assurer que le sujet n'utilise que les muscles responsables du mouvement de flexion plantaire sur le Kin-Com, certains parvenaient à augmenter leur force de contraction enregistrée avec l'aide de leur autre jambe. Ce fait compromet la validité des mesures prises



lors de la collecte de donnée. Cependant, il est tout de même plausible d'affirmer que la majeure partie de la force enregistrée sur le Kin-Com est due à l'activité des muscles responsable de la flexion plantaire. Aussi, le test fut exactement le même avant, pendant et après l'entraînement ce qui fait que nos mesures demeurent tout de même fidèles et que l'erreur est demeurée constante.

Les tests de volumes furent modifiés en cours d'expérimentation : initialement une plethysmographie par immersion était prévue afin de mesurer le volume total de la jambe. Le plethysmographe n'ayant pas été disponible lors de la passation du pré-test, nous avons du renoncer à cette mesure. Également, 3 mesures de circonférences de la jambe furent prévues au départ en fixant comme point de repère la distance par rapport plateau tibial des sujets. L'identification du plateau tibial fut une tâche ardue d'un sujet à l'autre et le responsable de recherche ne fut pas assez sûr si l'emplacement des 3 mesures de circonférence fut exactement les même entre le pré-test et le test intermédiaire. Étant donné que la variation de l'endroit mesurer pouvait avoir un effet important sur la circonférence sans que cela ne soit due à l'entraînement le responsable de recherche à décider de conserver la mesure de circonférence la plus fiable; celle du ventre des gastrocnémiens. La mesure de volume est donc toujours valide et fidèle, mais moins complète que ce qui était prévu au départ. D'autres instruments de mesure pourraient être utilisés lors d'expérimentations semblables pour confirmer ces observations.

L'entraînement par électrostimulation avec des sujets humains apporta plusieurs contraintes pratiques. Les entraînements ont eu lieu 3 fois par semaines mais quelquefois à des heures variables selon la disponibilité des sujets. Il est clair que régulariser les jours d'entraînement aurait amélioré la récupération de certains sujets qui devaient s'entraîner quelquefois 2 journées consécutives pour conserver leur 3 entraînements par semaines.

Également, les électrodes utilisées étant des éponges humides, nous avons remarqué que le placement de celles-ci influençait grandement la perception de contraction des sujets. Nous avons également constaté qu'il y avait un effet de radiation important due à la grandeur des électrodes utilisées (8,5 cm de diamètre). Les sujets disaient ne pas ressentir les mêmes effets,

les mêmes sensations d'un entraînement à l'autre (douleur à des places différentes entre les entraînements). L'utilisation de nos grandes électrodes a quelquefois entraîné la contraction de muscles voisins ce qui expliquerait en partie les différentes sensations perçues par les sujets du groupe expérimental selon les séances. Ce fait a également été rapporté par Lawani, 1993. L'utilisation d'électrode plus petite pourrait aider à régler le problème dans des études ultérieures. Cependant, ce même auteur explique que l'utilisation de grandes électrodes facilite la dispersion du courant, rendant la stimulation plus agréable. Il reste à déterminer quel type d'électrode conviendrait le mieux à des sujets ayant subi une rupture du tendon d'Achille donc moins apte à ressentir une douleur à la jambe comparativement à des sujets «sains».

Nous avons également remarqué que le courant employé fut variable d'un sujet à l'autre et d'un entraînement à l'autre, souvent la limite de tolérance du sujet fut la limite employée pour l'entraînement. Il est difficile d'évaluer si nos paramètres d'entraînement ont été optimaux étant donné que la plupart du temps, c'est le seuil de douleur du sujet qui réglait l'intensité de l'entraînement. Or, durant les séances d'électrostimulation, l'activité musculaire semblait quelquefois varier entre les entraînements, alors que la douleur perçue par les sujets était toujours à peu près semblable allant dans le sens qu'il n'a pas de corrélation directe entre la douleur ressentie et la force de contraction générée (Portmann, 1991) ou encore entre le courant employé et la force de contraction (Selkowitz, 1989). Même s'il semble correcte d'affirmer que de façon générale, une augmentation du courant provoquait une augmentation de la contraction du muscle chez nos sujets tel que rapporté par Decherchi et al. 2002. Le sujet ayant pu tolérer le plus fort courant fut également celui avec la plus grosse masse musculaire et fut celui dont l'activité musculaire sembla générer la plus grande force de contraction. Un appareil étant capable de mesurer la force de contraction provoquer par l'électrostimulation à chaque entraînement comme il a déjà été effectué dans d'autres études (Brocherie et al., 2005, Pichon et al., 1995, Maffiuletti et al., 2000) pourrait grandement aider à améliorer les paramètres d'entraînement, tels la fréquence, le courant employé et la durée de la phase, afin de les rendre optimaux ou d'ajouter des points de comparaisons plus clairs quant à l'effet de l'utilisation des paramètres de stimulation choisis et leur effets sur la force de contraction.

## CONCLUSION

La rupture du tendon d'Achille est une blessure commune surtout due à l'accroissement du temps de loisirs présents dans notre société occidentale. Lorsqu'un tel type de blessure survient, la qualité de vie de la personne l'ayant subie est grandement affectée notamment due à une perte chronique de force et de volume. Plusieurs alternatives sont présentes pour ces personnes, mais il est encore aujourd'hui difficile d'espérer un retour de la force et du volume de la jambe comme avant la rupture.

Le but de la recherche fut d'observer si un entraînement par électrostimulation de 8 semaines à raison de 3 fois par semaine peut provoquer un gain de force et de volume sur une jambe pour éventuellement aider quelqu'un ayant subi une rupture du tendon d'Achille.

Les résultats ont montré des gains significatifs en force concentrique et isométrique sur la jambe entraînée. Les résultats n'ont pas montré de gain en force excentrique mais un gain en force excentrique serait probable en utilisant plus de sujets ou en allongeant la période d'entraînement.

Aucun gain en volume ne fut observé. Cependant quelques changements morphologiques ayant des effets bénéfiques sur la masse musculaire semblent présent, des études plus poussées sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

D'autres études sont à prévoir pour observer si l'électrostimulation est une alternative intéressante pour les personnes ayant subi une rupture du tendon d'Achille.

## RÉFÉRENCES

- Adrian, E. D. et Bronk, D. W. 1929. «The discharge of impulses in motor nerve fibers». *Journal of physiology*, vol. 67, p. 3-151.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Trolle, M., Bangsbo, J. et Klausen, K. 1994. «Effects of different strength training regimes on moment and power generation during dynamic knee extensions». *European Journal of Applied Physiology*, vol. 69, p. 382-386.
- Alfredson, H., Pietila, T., Jonsson, P. et Lorentzon, R. 1998. «Heavy-load eccentric calf muscle training for the treatment of chronic achilles tendinosis». *The american journal of sport medicine*, vol. 26, no 3, p. 360-366.
- Alfredson, H., Pietila, T. et Lorentzon, R. 1996. «Chronic achilles tendinitis and calf muscle strength». *The american journal of sport medicine*, vol. 24, no 6, p. 829-833.
- Alfredson, H., Pietila, T., Ohberg, L. et Lorentzon, R. 1998. «Achilles tendinosis and calf muscle strength: the effects of short-term immobilization after surgical treatment». *The american journal of sports medicine*, vol. 26, no 2, p.166-171.
- Allen, D. G., Lannergren, J. et Westerblad, H. 1995. «Muscle cell function during prolonged activity: cellular mechanisms of fatigue», *Experimental physiology*, vol. 80, p. 497-527.
- Antonio, J. et Gonyea, W. J. 1993. «Skeletal muscle fiber hyperplasia». *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 25, p. 1333-1345.

- Baechele, T. R., Earle, R. W. et Wathan, D. 2000. «Essentials of strength training and conditioning». Winsor, Canada. Human Kinetics, p. 395-425.
- Bennie, S. D., Petrofsky, J. S., Nisperos, J., Tsurudome, M. et Laymon, M. 2002. «Toward the optimal waveform for electrical stimulation of human muscle». *European journal of applied physiology*, vol. 88, p. 13-19.
- Benton, L. A., Baker, L. L., Bowman, B. R. et Waters, R. L. 1980. «Functional electrical stimulation, a practical clinical guide». Downey, Californie. Ranchos los amigos, rehabilitation engineering center, Ranchos los amigos hospital.
- Bigland B. et Lippold, O. C. J. 1954. «Motor unit activity in the voluntary contraction of human muscle». *Journal of physiology*, vol. 125, p. 322-335.
- Bigland B. et Lippold, O. C. J. 1954. «The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles». *Journal of physiology*, vol. 123, p. 214-224.
- Bressel, E. et McNair, P.J. 2001. «Biomechanical behavior of the plantar flexor muscle-tendon unit after an Achilles tendon rupture». *The american journal of sport medicine*, vol. 29, no 3, p. 321-326.
- Brillault-Salvat, C. 1997. «Approche intégrée du métabolisme et de la perfusion musculaire en imagerie et spectroscopie par résonance magnétique nucléaire». Thèse de doctorat, Paris, Université de Paris.
- Brocherie, F., Babault, N., Cometti, G., Maffiuletti, N. et Chatard, J. C. 2004. «Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players». *Medicine & science in sports & exercise*, p. 455-459.
- Bronk, D. W. 1930. «The energy expended in maintaining a muscular contraction». *Journal of physiology*, vol. 69, 306-315.

- Butler, J. E., McKenzie, D. K. et Gandevia, S. C. 1999. « Discharge properties and recruitment of human diaphragmatic motor units during voluntary inspiratory tasks». *Journal of physiology*, vol. 518, no 3, p. 907-920.
- Cetti, R., Christensen, S. E., Ejsted, R., Jensen, N. M. et Jorgensen, U. 1993. «Operative versus nonoperative treatment of achilles tendon rupture: a prospective randomized study and review of the litterature». *The american journal of sport medicine*, vol 21, no 6, p. 791-799.
- Collin, D.F. 2007. «Central contributions to contractions evoked by tetanic neuromuscular electrical stimulation». *Exercise and sport sciences reviews*, vol. 35, no 3, p. 102-109.
- Colson, S., Martin, A. et Van Hoecke, J. 2000. «Re-examination of training effects by electrostimulation in the human elbow musculoskeletal system». *International journal of sports medicine*, vol. 21, p. 281-288.
- Cometti, G. 1994. «Intérêt de l'électrostimulation dans l'entraînement des sportifs de haut niveau». Unité de formation et de recherche en science et techniques des activités physiques et sportives, université de Bourgogne, Dijon Cedex.
- Cometti, G. 1994. «Les méthodes de développement de la force». Centre d'expertise de la performance, université de Bourgogne, Dijon Cedex.
- Cometti, G. 2005. «Les mécanismes de la force». Centre d'expertise de la performance, Dijon.
- Cometti, G. 2005. «Les méthodes de développement de la force». Centre d'expertise de la performance, Dijon.

- Cooper, R. G., Edwards, R. H., Gibson, H. et Stokes, M. J. 1988. «Human muscle fatigue: frequency dependence of excitation and force generation». *Journal of physiology*, vol. 397, p. 585-599.
- Craig, B. 2001. «Hyperplasia : scientific fact or fiction?». *National strength & conditioning association*, vol. 23, no 5, p. 42-44.
- Cramer, R. M. 2002. «Effects of electrical stimulation-induced leg training on skeletal muscle adaptability in spinal cord injury». *Scandinavian journal of medicine & science in sport*, vol. 12, p. 316-322.
- De Bisschop, E., Commandré, F., De Bisschop, G., Bence, Y. et Duranceau, J. 2001. «Apport de l'électromyostimulation dans le traitement des lésions tendineuses». *Le spécialiste de médecine du sport au service des praticiens*, no 36, p. 17-19.
- De Bisschop, G., Dumoulin, J. et Aaron, C. 1989. «Électrothérapie appliquée». Paris, Milan, Barcelone, Mexico. Masson.
- De Bisschop, G., Dumoulin, J. et Commandré, F. 2001. «Courants de moyenne fréquence et d'interférence Mise au point (1<sup>ère</sup> partie)». *Le spécialiste de médecine du sport au service des praticiens*, no 33, p. 47-53.
- De Bisschop, G., Dumoulin, J. et Commandré, F. 2001. «Application des courants de moyenne fréquence aux amyotrophies non neurogènes du quadriceps fémoral (2<sup>e</sup> partie)». *Le spécialiste de médecine du sport au service des praticiens*, no 34, p. 32-37.
- Decherchi, P., Dousset, E., Marqueste, T., Berthelin, F., Hug, F., Jammes, Y. et Grélot, L. 2003.. « Électromyostimulation et récupération fonctionnelle d'un muscle dénervé». *Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS*, vol. 5, p. 253-263.
- Decherchi, P., Marqueste T., Dousset, E., Berthelin, F., Hug, F., Gounard, F., Grélot, L. et Jammes, Y. 2002. «Électrothérapie et régénération nerveuse sensitive : mise au point

sur les recherches expérimentales actuelles». *Kinésithérapie, les annales*, no 11-12, p. 28-40.

Degens, H. 2007. «Age-related skeletal muscle dysfunction: causes and mechanisms». *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interaction*, vol. 7 no 3, p. 246-252.

Desmedt, J. E. et Godeaux, E. 1977. «Ballistic contraction in man characteristic recruitment pattern of single motor unit of the tibialis anterior muscle». *Journal of physiology*, vol. 264, p. 673-693.

Duchateau, J. 1992. Principe de l'électrostimulation musculaire et recrutement des différents types de fibres. *Science et motricité*, no 16, p. 18-24.

Dumoulin J. et de Bisschop, G. 1984. «Électromyographie et électrodiagnostics». Paris. Maloine s.a. éditeur.

Eberstein, A. et Eberstein, S. 1996. «Electrical stimulation of denervated muscle : is it worthwhile?» *Medicine and science in sport and exercise* , p. 1463-1469.

Favero, T. 1999. «Sarcoplasmic reticulum  $Ca^{2+}$  release and muscle fatigue», *Journal of Applied Physiology*, vol. 87, p. 471-483.

Fredon, J. P., Ferry, B., Favre-Juvin, A., Poumarat, G., Vanneuville, G. 1994. «Développement de la force musculaire sous électrostimulation». Archives internationales de physiologie, de biochimie et de biophysique. XIXème Congrès de biomécanique, Vaillant-Carmanne, Liège, p.C90.

Gandevia, S. C. 2001. «Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue». *Physiological reviews*, vol. 81, p. 1725-1789.



- Goldspink, D. F. 1978. «The influence of passive stretch on the growth and protein turnover of the denervated extensor digitorum longus muscle». *Biochemical Journal*, vol.174, p. 595-602.
- Goldspink, D. F. 1991. «Exercise-related changes in protein turnover in mammalian striated muscle». *Journal of experimental biology*, vol. 160, p. 127-148.
- Goldspink, D. F., Easton, J., Winterburn, S.K., Williams, P. E. et Goldspink, G. E. 1991. «The role of passive stretch and repetitive electrical stimulation in preventing skeletal muscle atrophy while reprogramming gene expression to improve fatigue resistance». *Journal of cardiac surgery*, vol. 6, p. 218-224.
- Gouvernement du Canada. 1986. «Physitest Normalisé Canadien (PNC)- manuel technique». 3<sup>e</sup> édition. Condition physique et Sport Amateur Canada.
- Häkkinen, K., Alen, M., Kraemer, W. J., Gorostiaga, E., Izquierdo M., Rusko, H., Mikkola, J., Häkkinen, A., Valkeinen, H., Kaarakainen, E., Romu, S., Erola, V., Ahtiainen, J. et Paavolainen, L. 2003. «Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training». *European Journal of Applied Physiology*, vol. 89, p. 42–52.
- Herbert, R. D., Dean, C. et Gandevia, S. C. 1998. «Effect of real and imagined training on voluntary muscle activation during maximal isometric contractions». *Acta physiologica (scandinavica)*, vol. 163, p. 361-368.
- Hoefnagels, E. M., Waites, M. D., Belkoff1, S. M. et Swierstra, B. A. 2007. « Percutaneous Achilles tendon lengthening: A cadaver-based study of failure of the triple hemisection technique». *Acta Orthopaedica*, vol. 78, no 6, p. 808-812.
- Howley, E. T. et Franks, B. D. 1997. «Health fitness instructor's handbook». 2<sup>e</sup> edition. Human kinetics. Champaign.

- Incedon, T. et Antonio, J. 2000. «Skeletal muscle fiber hyperplasia : why it can or cannot occur in humans». *National strength & conditioning association*, vol. 22, no 2, p. 28-29.
- Järvinen, T. A. H., Kannus, P., Paavola, M., Järvinen, T. L. N., Jozsa L. et Järvinen M. 2001. «Achilles tendon injuries». *Current opinion in rheumatology*, vol. 13, p. 150-155.
- Jozsa, L., Kvist, M., Balint, B. J., Reffy, A., Järvinen, M., Lehto, M. et Barzo, M. 1989. «The role of recreational sport activity in Achilles tendon rupture». *The american journal of sport medicine*, vol. 17, no 3, p. 338- 343.
- Kadi, F., Schjerling, P., Andersen, L. L., Charifi, N., Madsen, J. L., Christensen, L. R. et Andersen, J. L. 2004. «The effects of heavy resistance training and detraining on satellite cells in human skeletal muscles». *Journal of physiology*, vol. 558, no 3, p. 1005-1012.
- Kangas, J., Pajala, A., Siira, P., Hamalainen, M. et Leppilahti, J. 2003. «Early functional treatment versus early immobilization in tension of the musculotendinous unit after Achilles rupture repair : a prospective, randomized, clinical study.» *The journal of trauma: injury, infection and critical care*, vol. 54, no 6, p. 1171-1180.
- Kelly, G. 2006 «Body temperature variability (part 1): A review of the history of body temperature and its variability due to site selection, biological rhythms, fitness and aging». *Alternative medicine review*, vol. 11, no 4.
- Kirkendall, D. R., Gruber, J. J. et Johnson, R. E. 1987. «Measurement and evaluation for physical educators». Human kinetics publishers. 2è edition. Champaign.
- Kitchin, A. H. 1963. «Peripheral blood flow and capillary filtration rates». *British medical bulletin*, vol. 19, p. 155-160.

- Latasch, M.L., Yee, M. J., Orpett, C., Slingo, A., Nicholas, J.J. 1994. «Combining electrical muscle stimulation with voluntary contraction for studying muscle fatigue». *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 75, p. 29-35.
- Lawani, N. M. 1993. «Étude de la contraction musculaire isométrique maximale volontaire et electro-induite. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal.
- Lelièvre, Y. 2001. «Tendinopathies : protocole du Dr Stanish». *Le spécialiste de médecine du sport au service des praticiens*, no 36, p. 12-16.
- Lippold, O. C. J. 1952. «The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension». *Journal of physiology*, vol. 117, p.492-499.
- Lombard, W. P. 1892. «Some of the influences which affect the power of voluntary muscle contraction». *Journal of physiology*, vol. 13, p. 1-58.
- Lowe, D. A. et Alway, S. E. 2002. «Animal models for inducing muscle hypertrophy : are they relevant for clinical applications in human?». *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, vol. 32, p. 36-43.
- Maffiuletti, N. A., Cometti, G., Amiridis, I. G., Martin, A., Pousson, M. et Chatard, J. C. 2000. «The effects of electromyostimulation training and basketball practice on muscle strength and jumping ability». *International journal of sports medicine*, vol. 21, p. 437-443.
- Maffiuletti, N. A., Pensini, M. et Martin, A. 2002. «Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training». *Journal of applied physiology*, vol. 92, p. 1383-1392.

- Maffulli, N., Tallon, C., Wong, J. Peng Lim, K. et Bleakney, R. 2003. «Early weightbearing and ankle mobilisation after open repair of acute midsubstance tears of the achilles tendon». *The american journal of sport medicine*, vol. 31, no 5, p. 692-700.
- Maitre, S. 2000. «Influence de l'électromyostimulation de surface sur la récupération des paramètres musculaires et la lactatémie sanguine au cours d'un exercice sur presse inclinée». D.E.A. sport et performance, Clermont-Ferrant, Université Baise-Pascal.
- Malissard, M. 1992. «Critère d'optimisation des paramètres de la stimulation électrique pour la rééducation périnéale». Thèse de doctorat, Lyon (France), Université Claude-Bernard.
- Mannheimer, J. S. et Lampe, G. N. 1984. «Clinical transcutaneous electrical nerve stimulation». F.A. Davis Company.
- Martin, L., Cometti, G. et Morlon, B. 1994. «The influence of electrostimulation on mechanical and morphological characteristics of the triceps surae». *Journal of sports sciences*, vol. 12, p. 377-381.
- Maxwell, L.C., Moody, M. et Enwemeka C.S. 1992. «Muscle atrophy continues during early return to Weight-Bearing after tendon repair». *The Anatomical Record*, vol. 233, p. 376-386.
- McKenzie, D. K., Allen, G. M., Butler, J. E. et Gandevia, S. C. 1997. «Task failure with lack of diaphragm fatigue during inspiratory resistive loading in human subjects». *Journal of applied physiology*, vol. 82, p. 2011-2019.
- McKenzie, D. K., Bigland-Ritchie, B., Gorman, R. B. et Gandevia, S. C. 1992. «Central and peripheral fatigue of human diaphragm and limb muscles assessed by twitch interpolation». *Journal of applied physiology*, vol. 454, p. 643-656.

- Mercier, J. 1992. Bases électriques et biochimiques du fonctionnement du nerf et du muscle». *Électrostimulation des nerfs et des muscles*. Pelissier J. et Roques C. F., vol. 22, p. 1 à 16.
- Merton, P. A. 1954. «Voluntary strength and fatigue». *Journal of physiology*, vol. 123, p. 553-564.
- Moreno-Aranda, J. et Seireg, A. 1981. «Electrical parameters for over the skin muscle stimulation». *J. Biomech.*, vol. 14, p. 579-585.
- Mortensen, H. M., Skov, O. et Jensen P. E. 1999. «Early motion of the ankle after operative treatment of a rupture of the Achilles tendon. A prospective, randomized clinical and radiographic study.» *The journal of bone & joint surgery*, vol. 81, no 7, p. 983-990.
- Morth, S. 2002. «L'électrostimulation qu'en est-il?» *EPS*, no 297, p.41-44.
- Milner-Brown, H. S., Stein, R. B. et Yemm, R. 1973. «The orderly recruitment of human motor units during voluntary isometric contractions». *Journal of physiology*, vol. 230, p. 359-370.
- Nardone, A. et Scheppati, M. 1988. «Shift of activity from slow to fast muscle during voluntary lengthening contractions of the triceps surae muscles in humans». *Journal of physiology*, vol. 395, p. 363-381.
- Paillard, T., Lafont, C., Soulat, J. M., Costes-Salon, M. C., Mario, B., Montoya, R. et Dupui, P. 2004. «Neuromuscular effects of three training methods in ageing women». *The journal of sports medicine and physical fitness*, vol. 44, no 1, p. 87-91.
- Pichon, F., Chatard, J.C., Martin, A. et Cometti, G. 1995. «Electrical stimulation and swimming performance», *Medicine & science in sports & exercise*, p. 1671-1676.

- Portmann, M. 1991. «Amélioration de la force musculaire au moyen de la stimulation électrique et application à l'entraînement sportif». Thèse de doctorat, Montréal, Université de Montréal.
- Pneumaticos, S. G., McGarvey, W. C., Mody, D. R. et Trevino, S. G. 2001. «The effects of early mobilisation in the healing of achilles tendon repair». *Foot & ankle international*, vol. 21, no 7, p. 551-557.
- Qin, L., Appel, H. J., Chan, K. M. et Maffulli, N. 1997. «Electrical stimulation prevents immobilization atrophy in skeletal muscle of rabbits». *Archives of physical medicine et rehabilitation*, vol. 78, no 5, p. 512-517.
- Rassier, D. E., MacIntosh, B. R. et Herzog, W. 1999. «Length dependence of active force production in skeletal muscle». *Journal of applied physiology*, vol. 86, no 5, p. 1445-1457.
- Rennie, M. J., Wackerhage, H., Spangenburg, E. E. et Booth, F. 2004. «Control of the size of the human muscle mass». *Annual reviews of physiology*, vol. 66, no 13, p.1-30.
- Rhea, M. R., Alvar, B. A., Burkett L. N. et Ball, S. D. 2003. «A meta-analysis to determine the dose response for strenght development». *Medicine and science in sport and exercise*, vol. 35, p. 356-464.
- Saltzman, C. L. et Tearse, D. S. 1998. «Achilles tendon injuries». *Journal of the american academy of orthopaedic surgeons*, vol. 6, p. 316-325.
- Schepesis, A. A., Jones H. et Haas, A. L. 2002. «Achilles tendon disorders in athletes». *The american journal of sports medicine*, vol. 30, no 2, p.287-305.
- Schepull, T., Kvist, J., Andersson, C. et Aspenberg, P. 2007. «Mechanical properties during healing of Achilles tendon ruptures to predict final outcome: A pilot Roentgen

- stereophotogrammetric analysis in 10 patients». *Bio Med Central: Musculoskeletal Disorders*, vol. 8, p.116.
- Sejersted, O. M. et Sjogaard, G. 2001. «Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue». *Physiological reviews*, vol. 80, no 4, p. 1411-1481.
- Selkowitz, D. M. 1989. «High frequency electrical stimulation in muscle strengthening: a review and discussion». *American journal of sports medicine*, vol. 17, no 1, p. 103-111.
- Shima, N., Ishida, K. et Katayama K., Morotome, Y., Sato, Y. et Miyamura, M. 2002. «Cross education of muscular strength during unilateral resistance training and detraining». *European journal of applied physiology*, vol. 86, p. 287-294.
- Siatras, T., Poumarat, G., Boucher, J. P. et Le Flohic, J. C. 1994. «Normal and paralysed muscle force and fatigability induced by electrical stimulation». *Journal of manipulative and physiological therapeutics*. Vol. 17, no 5, p. 321-328.
- Taillefer, F. 1996. «Évolution de l'impulsion verticale au cours de différents types d'entraînements par électrostimulation». Mémoire de maîtrise, Montréal, Université de Montréal.
- Thiery, J. F., Ferro, R. M., Drouin, C. et De Belenet, H. 2001. «La téno-synthèse percutanée dans les ruptures fraîches du tendon d'Achille». *Le spécialiste de la médecine du sport au service des praticiens*, no. 36, p.9-11.
- Valli, P., Boldrini, L., Bianchedi, D., Brizzi, G. et Miserocchi, G. 2002. «Effects of low intensity electrical stimulation on quadriceps muscle voluntary maximal strength». *Journal of sports medicine and physical fitness*, vol. 42, no 4, p.425-430.

- Vandenburgh, H. H. 1987. «Motion into mass: how does tension stimulate muscle growth?». *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 19, p.142-149.
- Vanderthommen, M., Gilles, R., Carlier, P., Ciancabilla, F., Zahlan O., Sluse, F. et Crielaard, J. M. 1999. «Human muscle energetics during voluntary and electrically induced isometric contractions as measured by P NMR spectroscopy». *International journal of sports medicine*, vol. 20, p. 279-283.
- Volonte, D., Liu Y. et Galbiati, F. 2004. «The modulation of calveolin-1 expression controls satellite cell activation during muscle repair». *The FASEB journal*, vol. 10, p. 1-36.
- Wagers, A. J. et Conboy, I. M. 2005. «Cellular and molecular signatures of muscle regeneration : current concepts and controversies in adult myogenesis». *Cell*, vol. 122, p. 659-667.
- Weineck, J. 1997. «Manuel d'entraînement». 4è édition. Édition Vigot. Paris.
- Worth, N., Ghosh, S. et Maffulli, N. 2007. «Management of acute Achilles tendon ruptures in the United Kingdom». *Journal of Orthopaedic Surgery*, vol. 15 no 3 p. 311-314.
- Wozniak, A. C., Kong, J., Bock, E., Pilipowicz, O. et Anderson, J. E. 2005. «Signaling satellite-cell activation in skeletal muscle: markers, models, stretch, and potential alternate pathways». *Muscle and nerve*, vol. 31, p. 283-300.
- Wren, T. A., Lindsey, D. P., Beaupre G. S. et Carter, D. R. 2003. «Effects of creep and cyclic loading on the mechanical properties and failure of human Achilles tendons». *Annals of biomedical engineering*, vol. 31, no 6, p. 710-717.



## Annexe 1

**FORMULAIRE DE CONSENTEMENT****Effets de l'entraînement en électrostimulation suite à une rupture du tendon d'Achille**

Notre recherche a pour but de vérifier si, suite à une rupture du tendon d'Achille, il est possible d'améliorer la force et le volume de la jambe blessée par un entraînement en électrostimulation.

Vous serez appelés à passer des tests avant et après un entraînement en électrostimulation. Le but est de mesurer la force et le volume de votre jambe blessée comparativement votre jambe non blessée. Ces tests seront dispensés à l'intérieur des laboratoires du département de kinanthropologie de l'UQÀM. Vous serez également assujetti à un entraînement en électrostimulation d'une durée de 8 semaines à raison de 3 fois par semaines, précédé d'un échauffement et terminé par un retour au calme sur vélo stationnaire. De plus, afin d'identifier les modalités de traitement, nous vous demandons la permission d'accéder à votre dossier contenant votre programme actuel de réadaptation.

Les avantages pouvant survenir suite votre participation à la recherche sont les suivants : gain de force et en volume de votre jambe blessée.

Les risques auxquels vous vous exposé suite à votre participation à la recherche sont les suivants : risque de douleur musculaire aiguë due à l'entraînement, risque d'irritation et brûlure cutanée, risque d'électrocution (utilisation d'un appareil électrique), risque de ré rupture du tendon.

Afin de minimiser les risques d'inconvénients, les mesures suivantes vont être prises :

L'électrostimulation effectuée avec le suivi et la supervision d'un responsable (personne ayant des notions en électrostimulation et en physiologie) afin de minimiser le risque d'une électrostimulation excessive. L'appareil d'électrostimulation utilisée est normalement utilisé par des physiothérapeutes et sera utilisé selon les directives du fabricant.

Le programme en électrostimulation sera administré de façon très progressive. Vous devrez être suivi par un thérapeute du sport parallèlement à notre entraînement. Vous devrez tenir un journal de bord durant leur 8 semaines d'entraînement et de réadaptation. La fréquence et le type d'onde utilisés sont peu douloureuse et apporte un moindre risque de brûlures cutanées. La peau de chaque patient va être soigneusement inspectée et nettoyée à l'endroit où seront apposé les électrodes en plus d'être vérifiée en cours de traitement.

Un article de de Bisschop et al. 2001., (*Apport de l'electromyostimulation dans le traitement des lésions tendineuses*, Le spécialiste de médecine du sport au service des praticiens, p. 17-19.) nous informe que l'utilisation de paramètres similaires en électrostimulation, si appliqué de façon délicate et progressive, amène plusieurs avantages quant à la réadaptation d'un tendon (rééducation moins longue, éloignement des risques de séquelles irréversibles, éloignement des facteurs de récurrence). Le risque de ré-rupture du tendon par cet entraînement est donc extrêmement faible (car conseillé par la littérature). Afin de s'assurer un risque minimal de ré-rupture, l'électrostimulation sera appliqué 6 à 8 semaines après la rupture du tendon avec le consentement du médecin traitant.

Le programme en électrostimulation va cesser au moindre risque de blessure grave décelé par le chercheur, le thérapeute du sport ou par vous-même.

Aucun dédommagement monétaire, d'aucune façon n'est prévu pour votre participation à cette recherche.

Vous êtes totalement libre de participer ou non à cette recherche et avez la possibilité de vous retirer en tout temps sans pénalité d'aucune forme.

Les résultats seront employés pour la rédaction du mémoire de M. Pierre-Marc Veillette et pour la rédaction d'article(s) scientifique(s). Vous pourrez être tenu au courant des conclusions par le responsable de façon orale ou via courrier électronique, selon votre demande.

L'anonymat des sujets et la confidentialité des données sont assurés par le traitement exclusif des données pour les fins mentionnées ci haut. Les données seront conservées dans un ordinateur nécessitant un mot de passe, les copies papiers seront gardées dans un classeur barré à clef.

**Coordonnées utiles :**

**Alain-S. Comtois, Ph.D. :** numéro de téléphone : (514) 987-3000 poste: 1506  
 adresse électronique : [comtois.alain-steve@uqam.ca](mailto:comtois.alain-steve@uqam.ca)

**Pierre-Marc Veillette, B.Sc. :** numéro de téléphone : (450) 669-6459  
 adresse électronique : [pierre marc v@yahoo.com](mailto:pierre_marc_v@yahoo.com)

**Département de kinanthropologie :** Université du Québec à Montréal  
 Case postale 8888, succursale Centre-ville  
 Montréal (Québec) Canada  
 H3C 3P8

Cette recherche a reçu l'approbation du Comité d'éthique du Département de Kinanthropologie (CÉKIN), un sous-comité du Comité institutionnel d'éthique de la recherche chez l'humain (CIÉR) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Toute question sur le projet, plainte ou commentaire peut être adressé au chercheur. Pour toute question sur les responsabilités des chercheurs ou dans l'éventualité où la plainte ne peut leur être adressé directement, vous pouvez faire valoir votre situation auprès du CÉKIN en contactant le responsable, M. Marc Bélanger (514-987-3000 poste 6862 ou [belanger.m@uqam.ca](mailto:belanger.m@uqam.ca)) ou auprès du CIÉR en contactant le Président du comité d'éthique, M. Joseph Joseph Levy (514-987-3000 poste 4483 ou [levy.joseph\\_josy@uqam.ca](mailto:levy.joseph_josy@uqam.ca)). Il peut-être également joint au secrétariat du CIÉR au numéro (514) 987-3000 # 7753.

S'il vous plaît, veuillez placer vos initiales dans la case si vous acceptez que nous accédions à votre dossier contenant votre programme de réadaptation.

---

**Signature du sujet**

---

**Pierre-Marc Veillette**

---

**Alain-Steve Comtois**

Annexe 2  
Suivi des sujets

Électrostimulation

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Semaine 1	mA Hz						
Semaine 2							
Semaine 3							
Semaine 4							
Semaine 5							
Semaine 6							
Semaine 7							
Semaine 8							

Nom	
Sujet #	
Jambe entraînée	

## Kin-Com

Ajustement banc (cm)	
Ajustement hauteur du pied (cm)	
Ajustement talon (cm)	
Ajustement pointe (cm)	
Bras de levier (cm)	
Angle de départ (°)	
Angle de fin (°)	
Force minimale concentrique (N)	
Force minimale excentrique (N)	
Force minimale isométrique (N)	

## Circonférences jambe droite

Endroit	Hauteur (cm)	Mesure #1 (cm)	Mesure #2 (cm)	Mesure #3 (cm)
Mi-dist. sup.				
Ventre gastroc.				
Mi-dist. inf.				

## Circonférences jambe gauche

Endroit	Hauteur (cm)	Mesure #1 (cm)	Mesure #2 (cm)	Mesure #3 (cm)
Mi-dist. sup.				
Ventre gastroc.				
Mi-dist. inf.				

## Pli cutané

Jambe droite		Jambe gauche	
--------------	--	--------------	--

## Date

--

## Autres commentaires du chercheur

--

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			

Date :	Effort physique Loisirs (1 à 5)	Effort Physique Travail (1 à 5)	Douleurs à la jambe (1 à 10)
Résultat :			
Description :			



Université du Québec à Montréal

Case postale 8888, succursale Centre Ville  
Montréal (Québec) Canada H3C 3P8

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL**  
**Comité départemental de déontologie**

Conformité à l'éthique en matière de recherche impliquant la participation de sujets humains

Le comité de déontologie du Département de kinanthropologie, mandaté à cette fin par le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal, a examiné le protocole de recherche suivant:

**Responsable:** M. Pierre-Marc Veillette supervisé par Dr. Alain Steve Comtois

**Département:** Kinanthropologie

**Titre:** Électrostimulation suite à une rupture du tendon d'Achille

Ce protocole de recherche est jugé conforme aux pratiques habituelles et répond entièrement aux normes établies par la Politique institutionnelle de déontologie de l'UQAM.

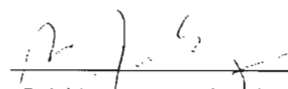
Le projet est jugé recevable sur le plan déontologique.

Membres du comité

NOM	POSTE OCCUPÉ	DÉPARTEMENT
Marc Bélanger	Professeur	Kinanthropologie
Jean-Paul Guillemot	Professeur	Kinanthropologie
Paul Hénault	Professeur	Kinanthropologie

Le 25 mai 2006

Date

  
Présidence du comité départemental

**UQÀM**