

Travail de Master pour l'obtention du titre de Master of Science

Unité « Sciences du Mouvement et du Sport »

Département de médecine, Université de Fribourg

**Etude comparative entre deux moyens de récupération  
appliqués à un muscle courbaturé : l'électromyostimulation  
et la récupération passive**

*« Mesure de l'effet à moyen terme d'un programme d'électromyostimulation sur le  
processus de récupération consécutif à une charge intense et inhabituelle appliquée  
au muscle gastrocnémien »*

Travail réalisé par Baptiste Jaquet

Conseiller : Prof. Dr. Wolfgang Taube

Co-conseiller : Alain Rouvenaz

Septembre 2013

# Sommaire

Résumé.....	4
1. Introduction .....	5
1.1 Contexte de départ.....	5
1.2 Problématique et questions de recherche .....	6
2. Approche théorique.....	7
2.1 Le muscle strié squelettique.....	7
2.1.1 Fonctions et propriétés.....	7
2.1.2 Du système nerveux central au muscle squelettique.....	8
2.1.3 Composition musculaire.....	8
2.1.4 Typologie des fibres musculaires .....	9
2.1.5 Contraction musculaire .....	10
2.2 Modalités de la force .....	11
2.4 Courbatures .....	14
2.4.1 Prévention et traitement des courbatures.....	18
2.5 L'électrostimulation.....	19
2.5.1 Historique de l'électrostimulation .....	19
2.5.2 Définition et champs d'application de l'électromyostimulation.....	21
2.5.3 Types de courant électrique .....	22
2.5.4 Les paramètres de la stimulation électrique.....	22
2.5.5 Recrutement des fibres musculaires sous électromyostimulation .....	24
2.6 Effets escomptés de l'électromyostimulation sur la récupération post-effort d'un muscle .....	26
2.6.1 Etat actuel de la recherche sur le sujet.....	27
3. Méthodologie .....	31
3.1 Population de l'étude.....	31
3.2 Protocole de test.....	32
3.3 Evaluations et instruments de recherche.....	33
3.3.1 Questionnaire perceptif de la douleur .....	33
3.3.2 Instruments de mesure de la force du mollet.....	35
3.3.3 Induction des courbatures sur le tapis de course.....	38
3.4 Récupération par électromyostimulation.....	40
3.4.1 Modèles d'appareil d'électrostimulation et récupération active .....	40
3.4.2 Paramètres de la séance d'électromyostimulation.....	42

3.4.3 Protocole de la séance d'électromyostimulation et de la période de récupération passive .....	43
3.5 Traitement et analyse statistique des données .....	44
4. Résultats.....	45
4.1 Résultats de la force maximale sur la jambe forte.....	45
4.2 Résultats de la force maximale sur la jambe faible .....	46
4.3 Résultats de la force explosive sur la jambe forte .....	47
4.4 Résultats de la force explosive sur la jambe faible.....	49
4.5 Résultats de la hauteur de saut des CMJ.....	50
4.6 Résultats de la force minimale des CMJ.....	51
4.7 Résultats de la force maximale des CMJ.....	52
4.8 Résultats de l'évaluation de la perception de la douleur .....	54
5. Discussion.....	55
5.1 Liens avec les connaissances actuelles .....	59
5.2 Limites de la recherche .....	60
5.3 Points forts de la recherche.....	61
5.4 Propositions d'axes de recherches pour des études futures.....	62
6. Conclusion .....	64
7. Bibliographie .....	65
8. Tables des illustrations .....	69
9. Déclaration personnelle.....	71
10. Droits d'auteur .....	72
11. Annexes .....	73
12. Remerciements .....	82

## Résumé

**Introduction :** il est établi que s'il veut retrouver l'entier de ses fonctionnalités après avoir subi un effort lui induisant des courbatures, le muscle de l'être humain a besoin d'une période de récupération. Plusieurs méthodes sont utilisées dans le but d'écourter cette période de récupération et de reprendre un travail musculaire optimal le plus rapidement possible. Parmi celles-ci, l'application de courants électriques sur la zone lésée a été de plus en plus pratiquée depuis ces vingt dernières années. Plusieurs études ont tenté de prouver l'efficacité d'une telle méthode sur un ou plusieurs muscles courbaturés, mais devant l'hétérogénéité des méthodologies utilisées dans ces recherches il est difficile de relever des résultats concluants. Cette étude cherche donc à apporter des précisions quant à l'éventuel effet bénéfique d'un tel procédé, appliqué sur le muscle du gastrocnémien, en utilisant des variables à la fois physiologiques et perceptives.

**Méthode :** trente sujets masculins divisés en deux groupes effectuent une course de dix minutes à huit km/h en marche arrière sur un tapis de course incliné de quatorze pourcent. Selon Law & Herbert (2007), ce type de charge est supposé induire de fortes courbatures au muscle gastrocnémien. Après ce test initial, le groupe Contrôle, composé de la moitié des sujets, prend part à une récupération passive. Le groupe Expérimental, constitué de l'autre moitié des sujets, récupère activement par le biais de l'application de courants électriques de basses fréquences, à raison d'une séance d'électromyostimulation par jour à la suite du test initial. Parallèlement, l'examineur procède à une première évaluation des qualités physiologique et perceptive (sensation de douleur) de base du muscle gastrocnémien de chaque sujet juste avant l'induction des courbatures. Ensuite, ces mêmes évaluations sont répétées quelques minutes, un, trois et cinq jours après le test initial.

**Résultats/conclusion :** les huit variables dépendantes représentant l'état physiologique et perceptif du mollet utilisées dans cette recherche ne révèlent pas de résultats concluants. Hormis quelques tendances aperçues à des endroits isolés grâce à l'analyse des variances et au test de Student, la comparaison des résultats entre les groupes C et E n'est statistiquement pas significative. Dans ce cas il en ressort qu'une méthode de récupération n'est significativement pas plus efficace que l'autre aux niveaux physiologique et perceptif. Aucun effet placebo n'est à relever.

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte de départ

En sport de haut niveau, la concurrence est grande et les résultats des compétiteurs se jouent souvent sur le soin apporté aux détails. Cela est permis grâce à la constante amélioration qualitative et quantitative du programme d'entraînement de l'athlète, composé de périodes d'entraînement et de périodes de repos. Ainsi, les techniques d'entraînement sont-elles constamment améliorées. S'agissant de la phase de récupération, l'objectif est de faire disparaître la fatigue le plus rapidement possible afin que l'athlète puisse s'astreindre à une nouvelle charge au plus vite.

Avec l'avancée de la technologie, couplée au savoir et à l'expérience dans le domaine de la récupération, il existe aujourd'hui différentes méthodes de récupération. Au niveau musculaire, les techniques les plus répandues sont thérapeutiques (massages, utilisations de courants électriques ou d'ultrasons, bains d'eau chaude ou froide). La prise de médicaments ou encore la supplémentation d'antioxydants comme des vitamines (Barnett, 2006 ; Bennett et al. 2010 ; Carcano et al. 2010 ; Connolly et al. 2003 ; Coudreuse et al. 2004 ; Herbert & Gabriel, 2002 ; Herbert et al. 2011) sont également des moyens couramment utilisés.

Alors que l'efficacité de certaines de ces méthodes (massages, stretching) semble controversée (Barnett, 2006 ; Carcano et al. 2010 ; Coudreuse et al. 2004 ; Herbert et al. 2002, 2011), d'autres, comme l'électromyostimulation, n'ont pas encore clairement démontré leurs propriétés régénératrices (Butterfield et al. 1997 ; Cortis et al. 2010 ; Lattier et al. 2004 ; Tessitore et al. 2007). En effet, depuis une vingtaine d'années, l'application d'un courant électrique sur un ou plusieurs muscles tend à se « banaliser » et est utilisée à une échelle de plus en plus large (athlètes et sportifs amateurs). Auparavant, cette pratique était beaucoup moins répandue<sup>1</sup>. Cependant, si les vertus de l'électromyostimulation en rééducation sont validées (Crépon et al. 2007 ; Decherchi et al. 2003 ; Maffiuletti, 2006 ; Vanderthommen et Crielaard, 2001), l'efficacité souhaitée par les concepteurs de cette technologie (aujourd'hui réduite dans un boîtier électronique de quelques centimètres cube) dans le domaine de la récupération après un effort n'a jamais été complètement validée par la communauté

---

<sup>1</sup> Vente de plusieurs dizaines de milliers d'appareils électrostimulateurs de la marque Compex dans le sport et sur le marché suisse depuis 1996, ainsi que plusieurs centaines de milliers dans le monde.

scientifique (Babault et al. 2011). Un certain nombre d'études ont déjà été réalisées, mais il est a priori difficile de tirer des conclusions définitives ; les méthodes utilisées dans ces travaux sont trop dissemblables pour pouvoir comparer des résultats entre eux. A l'heure actuelle, la communauté scientifique continue de porter un intérêt certain au domaine de l'électrostimulation et à son utilisation dans la pratique sportive ; il tente de prouver les bénéfices réels de cette méthode de récupération, loués par les concepteurs qui continuent pour leur part d'innover dans ce domaine, en proposant toujours plus de produits et de possibilités d'utilisation.

## 1.2 Problématique et questions de recherche

L'électrostimulation est utilisée dans plusieurs buts, mais ici, c'est son effet sur la récupération post-effort qui nous intéresse. Peu d'études (Allen et al. 1999 ; Babault et al. 2011 ; Butterfield et al. 1997 ; Craig et al. 1996 ; Martin et al. 2004 ; McLoughlin et al. 2004 ; Vanderthommen et al. 2007, 2010) ont été menées et encore moins de résultats concluants ont été trouvés sur l'influence de l'électromyostimulation en tant que moyen de récupération sur un muscle courbaturé après un effort intense et inhabituel. L'objectif est donc de mesurer l'efficacité de ce procédé sur la récupération consécutive à l'effort susmentionné, afin de peut-être contribuer à une évolution dans ce domaine précis. Le but principal de ce travail est de découvrir et d'analyser les effets et les influences que peut avoir un programme de récupération par électromyostimulation du muscle courbaturé, après un effort intense et inhabituel, et les comparer à ceux obtenus par le biais d'un programme de récupération passive.

L'hypothèse proposée est la suivante :

L'application répétée d'un programme de récupération par électromyostimulation après un effort intense et inhabituel sur un muscle courbaturé provoque une régénération accélérée à moyen terme. Voici les questions de recherches qui en découlent :

- L'électromyostimulation provoque-t-elle une accélération du processus de récupération du muscle du gastrocnémien courbaturé à la suite d'un effort intense et inhabituel ?

- L'électromyostimulation permet-elle de diminuer significativement les sensations de douleur accompagnant le muscle du gastrocnémien courbaturé à moyen terme ?

Le présent travail débute par une approche théorique développant le savoir nécessaire à la compréhension du sujet traité par la suite dans cette recherche.

## 2. Approche théorique

### 2.1 Le muscle strié squelettique

#### 2.1.1 Fonctions et propriétés

Selon la définition du mot dans le dictionnaire Le Petit Robert (1987), le muscle est une « Structure organique contractile qui assure les mouvements » (p. 1246). C'est cette structure organique qui permet à l'être humain de se mouvoir dans l'espace, d'attraper des choses, de maintenir des attitudes ou des postures. Il a également comme fonction de stabiliser les articulations du corps et de produire de la chaleur.

Un muscle est une structure organique dite « **excitable** » ; elle répond de façon spécifique à une stimulation. Le stimulus, qui peut-être de nature électrique, thermique, chimique ou mécanique, détermine une réponse mécanique. Il y a alors contraction du muscle.

Le muscle comporte également une propriété « **extensible** ». En effet il se déforme et peut s'allonger lorsqu'une force extérieure le sollicite. Sa capacité « **élastique** » lui permet de retrouver sa forme de base une fois que cette force disparaît.

Quatrième propriété principale du muscle, la « **contractilité** » est la capacité de cet organe à se raccourcir.

Enfin, la « **plasticité** » est une propriété qui permet au muscle de procéder à des changements cyto-architecturaux des fibres musculaires qui le composent, en réponse à des changements de types et de taux d'activités.

Dans le cas de notre étude, il est important de disposer des connaissances de base sur la structure organique du muscle squelettique afin de mieux comprendre le sujet traité par la suite.

## 2.1.2 Du système nerveux central au muscle squelettique

Pour reprendre l'image exposée dans l'ouvrage de Nguyen et Bourouina (2010), le système nerveux est comparable à un circuit électrique. On met le doigt sur l'interrupteur d'une lampe, le courant électrique s'active et longe le circuit, finissant par allumer la lampe. L'élément déclenchant ce processus est le stimulus. Dès lors la cellule excitable appelée alors « neurone » s'active et produit un influx nerveux, qui va parcourir le circuit nerveux composé d'un ou plusieurs neurones « attachés » les uns aux autres, jusqu'à l'organe effecteur (le muscle). Ce dernier exécute enfin l'ordre demandé. L'influx est constitué de signaux électriques créés par des changements temporaires du potentiel membranaire de repos <sup>2</sup> de la cellule nerveuse. Les changements très rapides de ce potentiel membranaire sont nommés « potentiel d'action ».

Le système nerveux central est composé de l'encéphale (tronc cérébral, cervelet, cerveau) et de la moelle épinière. C'est dans celle-ci que se situent notamment les « motoneurones  $\alpha$  », cellules nerveuses qui innervent l'ensemble des muscles du corps. Le système périphérique, lui, est constitué de nerfs divisés en deux types de fibres nerveuses différentes : les fibres nerveuses afférentes, qui acheminent l'information de la périphérie en direction du système nerveux central (stimulus, retour sensoriel de l'état de tension, d'étirement ou encore de contraction du muscle), et les fibres nerveuses efférentes, qui conduisent l'information depuis le système nerveux central jusque dans la périphérie (réponse musculaire).

## 2.1.3 Composition musculaire

Le muscle squelettique est composé d'un groupe de fibres musculaires liées les unes aux autres par un tissu conjonctif. Une fibre correspond à une cellule qui peut contenir jusqu'à plusieurs centaines de noyaux et qui peut mesurer jusqu'à vingt cm. Elle est elle-même constituée d'un groupe de centaines de fibrilles contractiles que l'on nomme « myofibrilles » (voir Fig. 1).

---

<sup>2</sup> De part et d'autre de la membrane cellulaire, l'intérieur est constitué d'ions chargés négativement ( $\text{Cl}^-$ ), alors que l'extérieur est composé d'ions chargés positivement ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ )



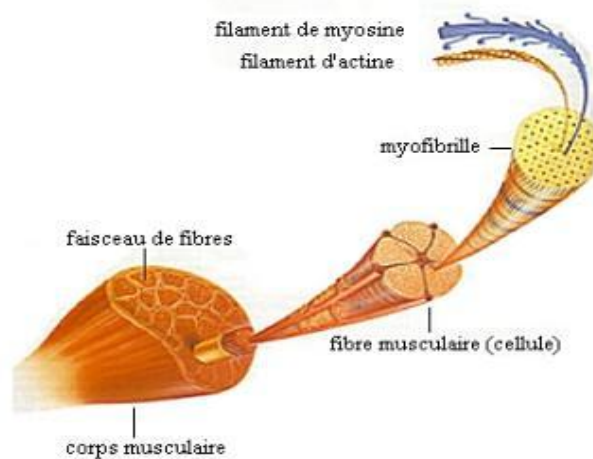


Fig. 1: composition structurelle du muscle

Si nous rentrons encore un peu plus profondément dans le muscle, nous nous apercevons que les myofibrilles sont constituées de myofilaments fins (composés d'« actine », protéine contractile) et épais (composés d'une autre protéine contractile, la « myosine »). Ces différents filaments sont alignés sur toute la longueur de la fibre musculaire de manière régulière. Les lignes dites « Z » font office de frontière entre chaque unité : c'est le « sarcomère », la plus petite unité contractile du muscle (Millet, Perrey, 2005).

#### 2.1.4 Typologie des fibres musculaires

Dans notre corps, il existe deux différents types de fibres musculaires striées. Leur vitesse de raccourcissement n'est pas identique ; elle dépend de la vitesse avec laquelle l'ATP (source énergétique du muscle) est métabolisée et de l'équipement enzymatique<sup>3</sup> que chaque type de fibre possède pour le faire (Nguyen, Bourouina, 2010).

**Les fibres I**, appelées également fibres rouges ou lentes, ont un métabolisme principalement oxydatif (utilisation de l'oxygène). Elles sont généralement peu nombreuses dans leur unité motrice<sup>4</sup> et sont activées par un motoneurone  $\alpha$  de diamètre petit à moyen, ce qui signifie que la vitesse de conduction est moindre. Lorsqu'elles s'activent, ces fibres se contractent lentement et leur amplitude est

<sup>3</sup> Une enzyme est une protéine qui joue un rôle de catalyseur biologique, c'est-à-dire qui facilite une réaction biochimique sans en modifier les produits. Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Enzyme>, consulté le 17 janvier 2013.

<sup>4</sup> Cf. Fig. 2

faible. En contrepartie, elles sont résistantes à la fatigue, ce qui permet au sportif d'effectuer des exercices de longues durées.

Au contraire **les fibres II** (fibres blanches ou rapides) ont un métabolisme davantage glycolytique. Une unité motrice de fibres II en contient généralement un très grand nombre et est commandée par un motoneurone  $\alpha$  de grand diamètre. Lors du processus de contraction, ces fibres s'activent très rapidement et fournissent une tension élevée. Cependant elles se fatiguent vite. Elles sont donc davantage sollicitées dans des exercices intenses, mais brefs (Monod, Flandrois, Vandewalle, 2007).

Dans le cas de notre étude, il est essentiel de savoir que lors d'un exercice, plus la force à développer est grande, plus conséquent sera le nombre de fibres musculaires et d'unités motrices recrutées. Cela s'appelle la « sommation spatiale ». Lors de l'augmentation progressive de la force, les petites unités motrices (fibres lentes) sont activées avant les grosses (fibres rapides). En effet plus le diamètre du corps cellulaire du motoneurone est petit, plus le neurone se dépolarisera facilement. C'est le principe de Henneman. Il est utile de préciser qu'il existe une intensité de stimulation minimale dite « liminaire » (seuil d'excitabilité) en dessous de laquelle une fibre musculaire ne se dépolarise pas. Ce seuil d'excitabilité varie notamment en fonction du muscle et du type de fibre stimulée (les fibres lentes possédant un seuil d'excitabilité plus bas que les fibres rapides).

Enfin, la « sommation temporelle », c'est lorsque l'on joue sur la fréquence de stimulation pour augmenter la « vitesse de montée en force » (Millet, Perrey, 2005, p. 46-47).

### 2.1.5 Contraction musculaire

Au niveau mécanique, la contraction musculaire se produit lorsqu'il y a liaison entre les myofilaments de myosine et d'actine, puis glissement les uns contre les autres : le sarcomère se « contracte ».

Pour faire le lien entre le chapitre 2.1.2 et 2.1.5 de cette étude, le potentiel d'action, parti des hautes instances d'initiation et de contrôle du mouvement et passant par la moelle épinière (motoneurone), se dirige vers la jonction neuromusculaire. Ici l'influx est transféré chimiquement. Un potentiel d'action se crée alors dans le muscle et se

propage sur le sarcolemme et dans les tubules transverses. Une vague de calcium (stocké en grande quantité dans le muscle) est alors libérée et parée à activer le mécanisme de contraction du sarcomère.

Il est important de préciser qu'en arrivant près du muscle, l'axone du motoneurone se divise en une multitude de petites branches. Chacune de ces ramifications va se greffer à une fibre musculaire. Un motoneurone innerve donc plusieurs fibres (jusqu'à 150 en moyenne). Cet ensemble est alors appelé « unité motrice » (voir Fig. 2).

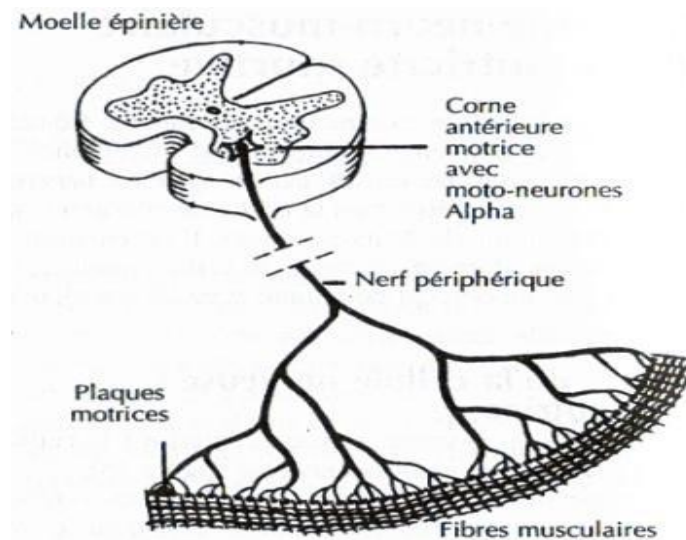


Fig. 2: représentation d'une unité motrice

## 2.2 Modalités de la force

Il est avant tout indispensable de définir le terme de « force ». En physique, la force est l'interaction entre deux objets ou systèmes ; elle représente une action mécanique capable d'imposer une accélération, ce qui engendre une modification du vecteur vitesse. La force musculaire est la capacité d'un muscle à exercer une force contre une résistance.

Selon « Manuel d'entraînement » de Weineck (1997), il existe trois principales modalités (formes) de la force: force maximale, force-vitesse (ou force explosive) et force-endurance. Les deux premières formes vont être utilisées lors de l'analyse des résultats du test de cette recherche.

La force maximale correspond au maximum de force que le système neuromusculaire peut développer en une seule contraction maximale volontaire. La force-vitesse est la capacité du système neuromusculaire à surpasser des

résistances en ayant la plus grande vitesse de contraction possible (force de sprint, force de saut, force de tir, force de lancer, force de frappe notamment). Enfin la force-endurance correspond à la capacité de résistance à la fatigue de l'organisme pour un effort de longue durée.

On distingue également plusieurs régimes de contraction musculaire :

« Le travail musculaire propulseur concentrique, prépondérant dans la majorité des activités sportives, permet, par le raccourcissement musculaire, de propulser le poids du corps ou des poids extérieurs dans une direction donnée, ou encore de surmonter une résistance. » Voici un exemple facile à comprendre : un individu soulève à l'aide de ses mains un simple objet posé sur une table contre lui.

« Le travail musculaire frénateur excentrique intervient dans la phase d'amortissement des sauts et dans l'exécution des mouvements de démarrage. Il est caractérisé par un accroissement en longueur du muscle (étirement) à travers une force active de réaction. » Dans notre exemple, lorsque le coude de l'individu s'étend pour poser un objet très lourd sur une table, les filaments d'actine de son biceps brachial s'éloignent du centre du sarcomère en l'étirant.

« Le travail statique sert à la fixation des segments corporels ou du corps dans son ensemble, dans une position déterminée. Il se caractérise par une contraction musculaire sans raccourcissement. » (Weineck, 1997, p. 182) Pour reprendre une dernière fois l'exemple précédent, l'individu essaie de soulever un objet trop lourd ou de porter un objet lourd, coude fléchi. Dans les deux cas, l'individu sent ses muscles se contracter, mais ceux-ci sont incapables de déplacer l'objet et donc ne peuvent se raccourcir (Wilmore, Costill, Kenney, 2009).

## 2.3 Fatigue et récupération

Le terme de fatigue musculaire englobe tous les phénomènes qui limitent la poursuite d'une activité physique ou qui ralentissent la restauration de la capacité de travail en une période de temps normal. Comme une certaine fatigue plus ou moins marquée est généralement perçue à la suite d'un entraînement, le corps doit se reposer et se régénérer avant de reprendre l'exercice : c'est la récupération. Bien que les limites de la fatigue soient repoussées avec l'entraînement, la récupération

qui s'ensuit est partie intégrante de la performance et malheureusement souvent sous-estimée des sportifs. Dans le cas où l'on négligerait la période de récupération au profit d'une période d'entraînement plus conséquente, les réserves d'énergie s'épuiseraient bien vite et les performances chuteraient rapidement. De plus, l'efficacité de l'entraînement sera d'autant meilleure si l'alternance entre la charge et la récupération est bien réfléchie et appliquée. Selon Weineck, dans son ouvrage « Manuel d'entraînement »(1997), la récupération se fait à plusieurs niveaux ; pendant l'effort, immédiatement après l'effort et tardivement après l'effort. C'est cette dernière récupération qui nous intéresse dans le cadre du présent travail :

**La récupération tardive après l'effort** : après des efforts importants, les réserves de glycogène hépatique<sup>5</sup> et musculaire diminuent progressivement, et les structures protéiques<sup>6</sup> de la cellule se dégradent. Dans le cas d'une blessure musculaire, différents composants du muscle peuvent être endommagés à plus ou moins long terme. Cela peut prendre bien des heures, voire des jours avant que les réserves d'énergie soient à nouveau pleines et que la régénération musculaire soit complète.

Il existe des modalités de récupération qui peuvent être mises en œuvre dans le but de récupérer plus rapidement. Des méthodes peuvent être utilisées par les pratiquants occasionnels, mais également et surtout par des athlètes, en vue de restaurer les réserves énergétiques et les propriétés physiologiques du muscle au plus vite et pouvoir ainsi s'astreindre à une nouvelle charge. Ces moyens de récupération peuvent être actifs (exemple : course) ou passifs (exemples : massages, sauna, bains massants, etc.) et n'ont pas tous la même efficacité. Le résultat des recherches tend à démontrer que la manière active était apparemment plus efficace que la méthode passive, à l'image des résultats d'une étude réalisée par Heyman et al. (2007) (abstraction faite de la nature de la charge). En effet quelques méthodes précises de récupération à court terme ont été testées sur des grimpeurs ; en ce qui concerne la vitesse de diminution du taux de lactate dans le sang, la récupération active (vélo) a été la meilleure, suivie par l'immersion dans l'eau froide. L'application de courant électrique sur la zone touchée et la récupération passive ont semblé inutiles. De même du côté des athlètes, une revue d'études a été

---

<sup>5</sup> Qui appartient au foie.

<sup>6</sup> Ce sont ici en grande partie des enzymes, utilisés dans le but de transformer l'ATP pour libérer l'énergie utile à la contraction musculaire (Millet, Perrey, 2005).

réalisée par Barnett (2006), relevant le manque de preuve d'une réelle efficacité de méthodes comme le massage, les étirements, l'immersion dans l'eau ou encore l'application de courant électrique lors de phases de repos entre les charges de travail.

## 2.4 Courbatures

Les douleurs musculaires d'apparition retardée ou DOMS en anglais (Delayed Onset Muscle Soreness) apparaissent régulièrement lors de la pratique du sport. Elles sont plus communément nommées « courbatures ». Elles augmentent dans les premières vingt-quatre heures après un exercice, restent fortement actives entre vingt-quatre et septante-deux heures, puis disparaissent progressivement entre le cinquième et le septième jour post-exercice. Ce genre de douleurs apparaît généralement après un travail musculaire inhabituel et intense. Ces dernières peuvent également survenir après une course de longue distance comme un marathon (Tiidus, 2008). Elles ne sont cependant pas à confondre avec des blessures de type élongation du muscle ou claquage<sup>7</sup>.

Pour la première fois en 1902, Hough (cité par Komi, 2011, p. 185) suggère que la douleur musculaire induite par un exercice est due à une rupture à l'intérieur du muscle. En 1951, Hill (cité par Komi, 2011, p. 185) pense que la douleur est la cause d'une blessure mécanique, distribuée à un niveau microscopique dans tout le muscle. De leur côté, Boje et Asmussen (cité par Komi, 2011, p. 185) suggèrent en 1956 que la production de douleurs se fait par le biais de dépôt de substances dans les différents tissus intramusculaires après des exercices qui étirent les muscles. Aujourd'hui encore le fonctionnement exact de la production de courbatures n'est pas avéré. Cependant, certaines théories fondées prennent la direction d'une explication relativement universelle, qui sera développée dans ce chapitre.

Asmussen remarqua, en 1956, qu'après des exercices en régime excentrique effectués sur le triceps brachial et le quadriceps femoris, des courbatures étaient à chaque fois présentes entre un et deux jours après l'exercice. Cela n'était pas le cas lorsque les participants exécutaient un travail musculaire de même intensité, mais en régime concentrique. Par la suite, la majorité des études réalisées montrèrent des

---

<sup>7</sup> Déchirure subite d'une certaine quantité (selon la gravité) de fibres musculaires durant un exercice généralement intense.

résultats similaires, comme celle de Komi et Rusko en 1974 (cité par Komi, 2011, p. 185). En effet il s'est avéré qu'en régime excentrique « freinateur », la force maximale développée est beaucoup plus grande que lors de contractions maximales en isométrique ou en concentrique avec la même vitesse angulaire (résistance à l'étirement des composantes élastiques du muscle). Le travail excentrique utilise également beaucoup moins d'énergie. Cela s'explique par le nombre réduit d'unités motrices recrutées à un niveau de force donné, mais également par la rupture mécanique de plusieurs ponts d'actomyosine (qui est causée par la force d'étirement sans dépense d'ATP).

Cependant une pratique d'exercices en régime excentrique prolongée et inhabituelle peut faire apparaître des microlésions (rupture des sarcomères, spécialement au niveau des lignes « Z »). La résorption de ces microlésions nécessite le développement d'un processus inflammatoire qui s'accompagne très souvent d'une sensation de douleurs ; au repos le sujet ressentira une douleur généralement diffuse au toucher. La même sensation est ressentie lors de contractions et d'étirements passifs. Cette douleur s'accompagne elle-même de déficiences proprioceptives, d'une perte importante de force maximale (jusqu'à quarante pourcent) et d'une diminution de l'amplitude articulaire. Un œdème peut apparaître dans la zone lésée. Un taux de lactate élevé a longtemps été considéré comme la cause principale de l'apparition des courbatures ; cette hypothèse n'est plus d'actualité (Coudreuse et al. 2004).

Selon Connolly et al. (2003), la réponse inflammatoire qui accompagne les microlésions amènerait à une synthèse de prostaglandines<sup>8</sup> et de leucotriènes<sup>9</sup>. La prostaglandine causerait la sensation de douleur en sensibilisant les nocicepteurs appartenant au groupe d'afférences de type III et IV, issues de terminaisons nerveuses libres. Les leucotriènes, eux, augmenteraient la perméabilité vasculaire et attireraient les neutrophiles<sup>10</sup> dans la zone endommagée. L'action de ces derniers

---

<sup>8</sup> Ce sont des métabolites de l'acide arachidonique, destinés à la sécrétion dans le milieu cellulaire. Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Prostaglandine>, consulté le 4 décembre 2012.

<sup>9</sup> Ce sont des lipides possédant un rôle chimiotactique pour les leucocytes sur des sites d'inflammation. Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Leucotri%C3%A8ne>, consulté le 4 décembre 2012.

<sup>10</sup> Ils sont un type de leucocytes responsables de la défense lors de processus inflammatoires. Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Leucocyte>, consulté le 4 décembre 2012.

générerait des radicaux libres<sup>11</sup> qui pourraient accentuer les dommages de la membrane cellulaire. Le gonflement du muscle résulte du mouvement de cellules et de fluides dans le flux sanguin et pourrait contribuer à la sensation de douleur (voir Fig. 3).

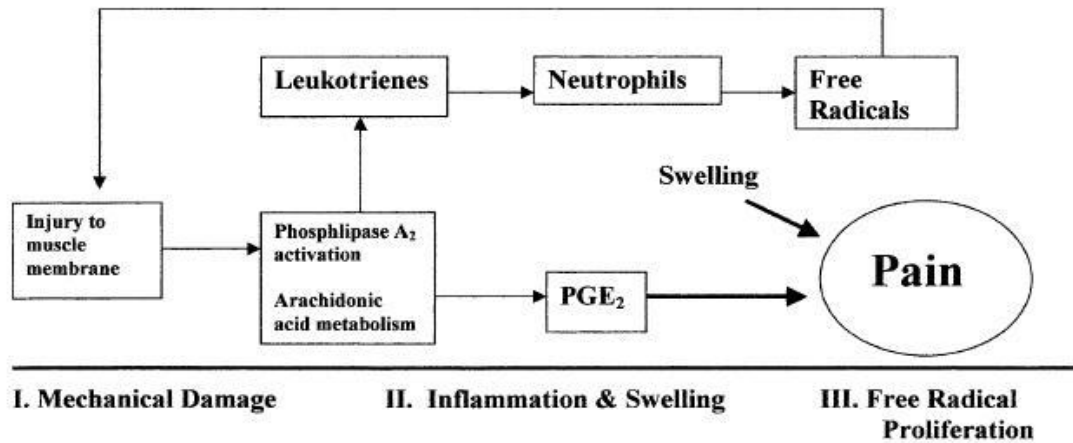


Fig. 3: résumé du processus de courbatures selon Connolly et al. (2003. p. 198)

Durant la période de courbatures, il est aussi possible de remarquer dans le sang une présence élevée d'enzymes musculaires comme la créatine kinase<sup>12</sup>.

Dans leur revue scientifique intitulée « Delayed post effort muscle soreness » Coudreuse et al. (2004) soutiennent les propos de nombreuses études (dont Cheung et al. 2003) quant à la période de récupération fonctionnelle dite « biphasique » après un exercice intense produisant des dommages musculaires et des courbatures. Cette dernière commence par d'importantes réductions immédiates des performances neuromusculaires et de la proprioception. Il s'ensuit une récupération partielle, voire totale, dans les trois heures après le travail musculaire. Puis de nouvelles baisses surviennent durant plusieurs jours (voir Fig. 4). On dit que ce n'est qu'après dix à quatorze jours que les fonctions et structures du muscle sont à nouveau à cent pourcent fonctionnelles (Komi, 2011).

<sup>11</sup> Ce sont des molécules instables endommageant les principaux constituants des cellules de l'organisme. Source : <http://www.medecine-anti-age.com/site/definition-54.html?idGlossaire=22>, consulté le 04 décembre 2012.

<sup>12</sup> La créatine kinase est une enzyme libérée dans le sang lors de lésions tissulaires. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A9atine\\_kinase](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A9atine_kinase), consulté le 24 mai 2013.



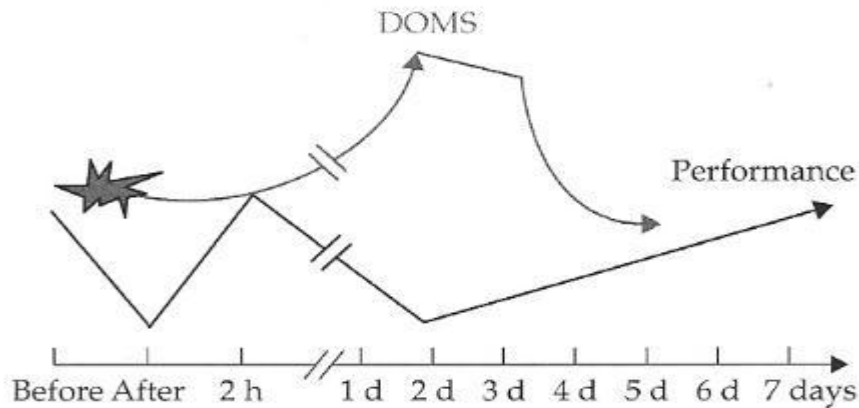


Fig. 4: parallèle de l'évolution dans le temps entre le niveau de performance et le niveau de courbatures ressenti (Komi, 2001. p. 193)

Enfin, il est important de souligner que les courbatures, étant en réalité un des symptômes du dommage musculaire, ne sont pas directement corrélées à cette lésion musculaire ; Il est envisageable de subir de fortes courbatures alors que les dommages sont moindres. L'inverse est également possible. La figure suivante démontre clairement ce phénomène, grâce à l'étude de l'évolution dans le temps des markers des différents symptômes du dommage musculaire (voir Fig. 5). Ce n'est finalement pas parce que la douleur a disparu que le muscle est totalement rétabli d'un point de vue structurel et fonctionnel. Le risque de blessure à ce moment-là est plus élevé. Le message qui nous est envoyé par les courbatures est toujours interprété de manière différente encore aujourd'hui. Certains pensent que c'est un signal d'alarme avant une blessure potentiellement plus grave, alors que d'autres n'en prennent pas garde (Tiidus, 2008).

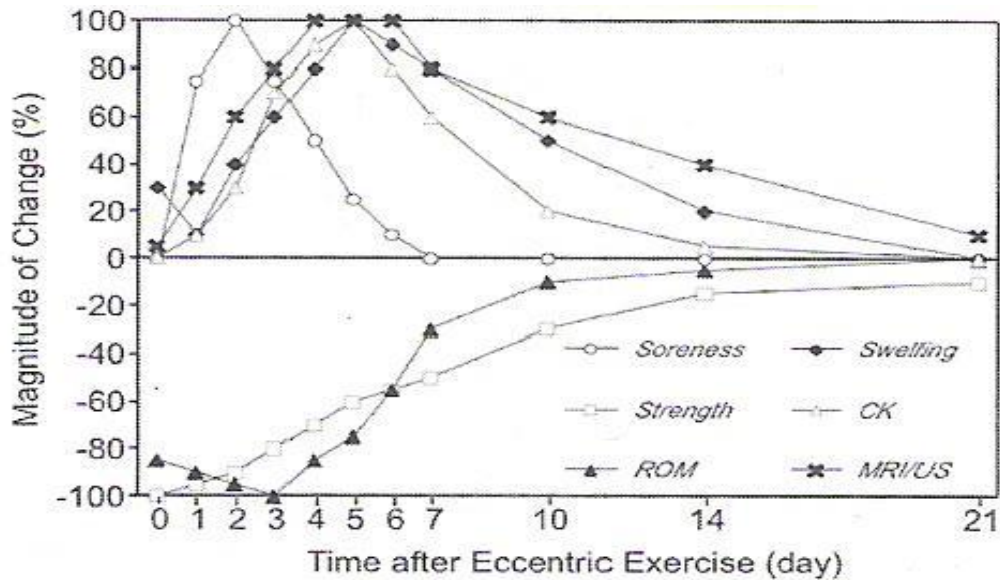


Fig. 5: évolution dans le temps des niveaux des markers des différents symptômes après un exercice causant des dommages musculaires (Soreness :douleur, Strength :force, ROM :amplitude articulaire, Swelling :gonflement, CK :créatine kinase, MRI/US : images magnétiques) (Tiidus, 2008. p.66)

### 2.4.1 Prévention et traitement des courbatures

Lors d'une expérience réalisée en 1985 déjà, Byrnes et al. ont découvert que la plupart des participants montraient des symptômes moins élevés de dommages musculaires après une deuxième session d'exercices excentriques. En effet l'intensité des courbatures et les taux de créatine kinase et de myoglobine étaient plus bas qu'après la première session d'exercices trois ou six semaines plus tôt. De nombreuses autres études tendent à confirmer ces dires (Foley et al. 1999, McHugh, 2003, Pizza et al. 1999, cités par Tiidus, 2008, p. 69). Il existe donc une certaine adaptation du muscle à l'exercice excentrique répété, qui se nomme en anglais « Repeated-Bout Effect ». Deux autres moyens de prévention efficaces restent un échauffement adapté avant l'effort ainsi qu'une association de travail concentrique à tout exercice excentrique. Enfin une augmentation progressive des charges de travail évite certainement le développement de courbatures trop intenses.

De nombreux traitements contre les courbatures sont en vogue de nos jours : cryothérapie, étirements, ultrasons, anti-inflammatoires, compressions, massages, oxygénothérapie hyperbare, etc. Il est important de souligner que ces méthodes n'ont jamais été réellement validées. Leurs vertus restent à prouver dans la grosse majorité des cas. Dans leur revue scientifique de 2003, Connolly et al. décrètent que seuls les anti-inflammatoires et les antioxydants ont un effet sur le traitement des

courbatures. Concernant le dernier nommé, l'oxygénothérapie, un article publié en 2010 (Bennett et al.) montre l'insuffisance de résultats concluant à l'influence de cette technique sur les courbatures. Dans son ouvrage, Tiidus (2008) reflète le succès de cette méthode sur des cas animaux, mais pas humains. Du côté des étirements, qu'ils soient réalisés avant, après, ou avant et après l'exercice, les résultats ne sont pas suffisamment significatifs concernant les douleurs musculaires d'apparition retardée et les performances neuromusculaires (Herbert et al. 2002, 2011).

Les résultats d'études ayant pour sujet le massage comme traitement des dommages musculaires et des courbatures sont également mitigés. Dans sa revue scientifique intitulée « Using Recovery Modalities between Training Sessions in Elite Athletes, Does it Help ? » Barnett (2006) relate que le massage n'est pas un bon moyen d'accélérer la circulation sanguine dans le but de nettoyer plus rapidement la zone endommagée. Celui-là n'est apparemment pas non plus efficace contre la perte de force. De plus, l'auteur fait remarquer que dans le cas de grosses lésions, le massage pourrait même être néfaste et empirer la situation. La diminution de courbatures et l'amélioration du bien-être grâce à l'application de massages ont néanmoins été relevées dans plusieurs autres études (Carcano et al. 2010). Enfin, associé à une autre technique de récupération comme le bain d'eau froide ou chaude, le massage pourrait avoir un effet bénéfique (Coudreuse et al. 2004).

Il existe une autre méthode de traitement qui nous intéresse tout particulièrement et qui fait beaucoup parler d'elle depuis une vingtaine d'années : l'électromyostimulation (la stimulation électrique du muscle). Elle est régulièrement utilisée dans plusieurs contextes et pas seulement dans le cadre de la récupération. Le chapitre suivant lui est consacré.

## 2.5 L'électrostimulation

### 2.5.1 Historique de l'électrostimulation

C'est durant la période de la Grèce antique que surviennent les premiers faits se rapportant à l'utilisation de poissons électriques (la torpille) comme agent thérapeutique, par engourdissement de la zone douloureuse. Cependant, l'électricité étant difficile à produire en quantité suffisante par l'homme à cette époque, il faut

attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle pour que des progrès soient effectués dans ce domaine. En 1746, Musschenbrock (1692-1761), professeur à l'Université de Leyde, présente sa bouteille, condensateur capable de stocker de l'énergie électrique. C'est depuis cette période que l'électricité est régulièrement utilisée en médecine. L. Galvani<sup>13</sup>, décrivant l'électricité animale et A. Volta<sup>14</sup>, travaillant lui, sur l'électricité bimétallique et la pile voltaïque, créent un nouvel élan dans les vertus curatives du Galvanisme<sup>15</sup>. Plusieurs traités vantant l'efficacité de cette méthode sur de nombreuses pathologies sont publiés. Malgré un accès plus pratique et plus facile à l'électricité grâce notamment à cette nouvelle pile, l'électrothérapie tombe en désuétude. Cette dernière retrouve du crédit lors de la découverte des phénomènes magnéto-électriques et des actions d'induction par Faraday<sup>16</sup> (créer de l'électricité avec le magnétisme) au début du XIX<sup>ème</sup> siècle. De nombreux appareils plus perfectionnés et accessibles aux médecins sont mis au point, notamment par Duchenne de Boulogne (1806-1875), homme français étudiant longtemps la physiologie des mouvements de l'homme au moyen de l'électrisation localisée et considéré comme le pionnier de l'électrothérapie (Gondin et al. 2011). Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle déjà, de nombreux ouvrages d'électrothérapie et appareils portatifs voient le jour.

Dans la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les recherches en électro-neurophysiologie se développent parallèlement à celles effectuées en électro-radiologie. Arsène D'Arsonval<sup>17</sup> marque notamment l'histoire de l'électricité médicale en dotant cette dernière de courants à haute fréquence. A partir de la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les progrès de l'électronique et du traitement informatique, accompagnés de la miniaturisation des appareils médicaux permettent à l'électrostimulation de se développer massivement en médecine physique et de réadaptation (Dolhem, 2008). De nos jours, cette pratique se retrouve notamment à la portée non plus seulement de médecins ou de physiothérapeutes, mais également d'entraîneurs, d'athlètes, voire même de sportifs amateurs.

---

<sup>13</sup> Luigi Galvani, 1737-1798, médecin et physicien italien. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Luigi\\_Galvani](http://fr.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani), consulté le 14 février 2013.

<sup>14</sup> Alessandro Volta, 1745-1827, physicien italien. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta), consulté le 14 février 2013.

<sup>15</sup> Le Galvanisme est la contraction d'un muscle stimulé par un courant électrique. Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Galvanisme>, consulté le 14 février 2013.

<sup>16</sup> Michael Faraday, 1791-1867, un physicien et un chimiste britannique. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](http://fr.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday), consulté le 14 février 2013.

<sup>17</sup> Arsène D'Arsonval, 1851-1940, médecin, physicien et inventeur français. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Ars%C3%A8ne\\_d'Arsonval](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ars%C3%A8ne_d'Arsonval), consulté le 14 février 2013.

## 2.5.2 Définition et champs d'application de l'électromyostimulation

En physiothérapie, le but est d'utiliser des agents physiques naturels ou artificiels, comme l'eau, le froid, la chaleur, les mouvements, à des fins thérapeutiques. Le courant électrique fait partie de ces agents et est régulièrement appliqué au niveau médical. L'application de courants électriques comme moyen thérapeutique est désignée par le terme d'« électrophysiothérapie ». L'électromyostimulation est une des techniques de l'électrophysiothérapie. Elle consiste à stimuler la partie terminale des fibres nerveuses motrices par le biais d'un courant électrique appliqué sur la peau dans le but de provoquer la genèse d'un potentiel d'action (Vanderthommen & Crielaard, 2001). Comme nous l'avons déjà vu, ce dernier finit par engendrer une contraction musculaire. On fera ici abstraction de toutes les phases antérieures réalisées lors du processus d'une contraction musculaire volontaire (voir Fig. 6).

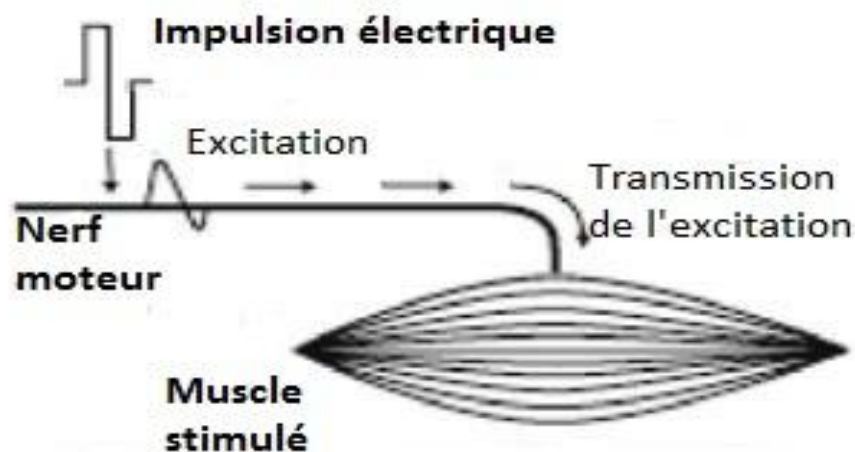


Fig. 6: influx nerveux lors d'une contraction émise par un courant électrique

Dans les dernières décennies, cette pratique s'est élargie, au point de ne plus seulement faire partie du domaine de l'électrophysiothérapie ; son champ d'application se diversifie toujours davantage ; elle reste bien sûr couramment utilisée en **rééducation** (fonctionnelle, respiratoire, neurologique, périnéale), notamment pour la prévention et le traitement des atrophies de non-utilisation ou de dénervation du muscle (Crépond et al. 2007 ; Vanderthommen & Crielaard, 2001). Son utilisation se fait également dans le domaine de **l'entraînement et du renforcement musculaire** (Dehail et al. 2008 ; Gondin et al. 2011 ; Maffiuletti, 2006 ;

Paillard et al. 2005 ; Vanderthommen & Crielaard, 2001). Enfin elle est de plus en plus sollicitée pour ses prétendues **vertus antalgiques** et en tant que **moyen de récupération** après un effort (Crépon et al. 2007 ; Babault et al. 2011 ; Ziltener & Chantraine, 1997).

Afin que l'utilisation de l'électrostimulation soit la plus efficace et la plus confortable possible dans chacun des domaines d'application ci-dessus, certains paramètres, le protocole et la méthodologie doivent être respectés. Voici la présentation et l'explication des différents éléments constituant la stimulation électrique transcutanée :

### 2.5.3 Types de courant électrique

Un courant électrique<sup>18</sup> peut être constant, cela signifie qu'il est continu et que son intensité est constante. A l'inverse, il peut être à l'état variable ; son intensité varie, du coup des impulsions<sup>19</sup> sont créées. Il a aussi la propriété d'être soit unidirectionnel (les électrons circulent dans le même sens, du pôle négatif vers le pôle positif), soit bidirectionnel. Ce dernier est dépolarisé ; après chaque impulsion le pôle négatif et le pôle positif s'inversent. Il est davantage sollicité en électrostimulation, car il est plus efficace, plus confortable pour le patient et ne comprend pas de gros risques de brûlure chimique contrairement au courant unidirectionnel (Crépon et al. 2007).

### 2.5.4 Les paramètres de la stimulation électrique

Les trois principaux paramètres à prendre en compte sont : l'amplitude, la durée et la fréquence des chocs (impulsions) électriques (voir Fig. 7). L'amplitude, mesurée en milliampère<sup>20</sup> (mA), est l'intensité du courant délivré, alors que la durée correspond à la durée de la phase (Decherchi et al. 2003).

---

<sup>18</sup> Définition : un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge électrique, généralement des électrons, au sein d'un matériau conducteur. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Courant\\_%C3%A9lectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_%C3%A9lectrique), consulté le 8 janvier 2013.

<sup>19</sup> Définition : une impulsion est une variation de courte durée d'une grandeur physique avec retour à l'état initial. Source : Crépon et al, 2011, Electrothérapie, Electrostimulation. Kinésithérapie-Médecine physique-Réadaptation, p. 2.

<sup>20</sup> Un courant d'un ampère correspond au transport d'une charge électrique d'un coulomb par seconde à travers une surface. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Amp%C3%A8re\\_\(unit%C3%A9\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Amp%C3%A8re_(unit%C3%A9)), consulté le 7 janvier 2013.

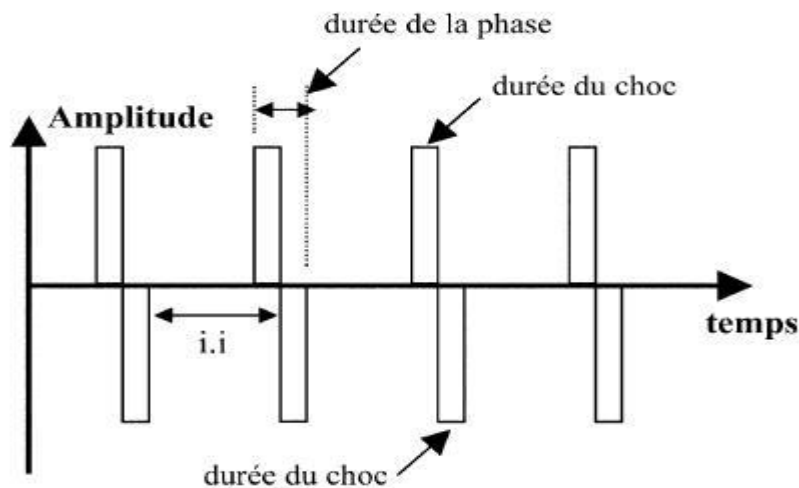


Fig. 7: représentation graphique d'un courant électrique bidirectionnel avec l'amplitude, la durée de la phase et du choc, et la fréquence (i.i) (Decherchi et al.2003. p. 255)

L'impulsion électrique peut également être de deux sortes : l'impulsion progressive et l'impulsion rectangulaire ou à début brusque. La première impulsion a tendance à être beaucoup moins utilisée en électromyostimulation. En effet si les impulsions ne progressent pas suffisamment vite, il y a des risques que le courant atteigne des intensités élevées sans provoquer d'excitation, alors que, pour ces mêmes intensités, une impulsion s'établissant instantanément atteint le seuil.

La cellule nerveuse suit la loi du « tout ou rien » ; aucun potentiel d'action ne survient si l'intensité du stimulus ne dépasse pas le seuil d'excitabilité (qui peut différer selon la fibre stimulée). Dès le moment où l'intensité atteint ou dépasse ce seuil, la dépolarisation qui reste, elle, d'une amplitude constante, apparaît. La valeur minimale de l'intensité d'une impulsion rectangulaire susceptible de provoquer un potentiel d'action s'appelle la « rhéobase ».

Lors de la stimulation électrique d'une fibre, on cherchera alors à faire passer le courant moyen le plus bas capable d'atteindre le seuil d'excitabilité, dans le but de créer un potentiel d'action. L'objectif principal étant de limiter d'éventuelles lésions et permettre au sujet d'avoir le meilleur confort possible. Le seuil peut être atteint en augmentant la durée et en diminuant l'intensité et vice-versa. Cette courbe de relation intensité-durée est spécifique pour chaque tissu et dépend de la profondeur de ce même tissu (Decherchi et al. 2003).

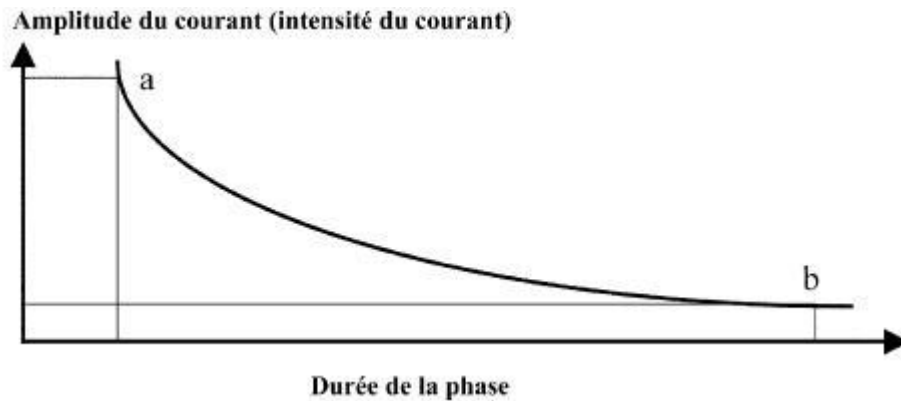


Fig. 8: graphe représentant la relation intensité-durée du stimulus électrique

La fréquence de stimulation (voir Fig. 7, p.20) est le nombre de chocs (impulsions) générés par seconde (unité : Hertz). Plus la fréquence est haute, plus le nombre de potentiels d'action déclenchés au cours de la stimulation est élevé. Que la fréquence soit élevée ou non, le même nombre de fibres est recruté. Cependant l'augmentation accrue de la fréquence provoque une élévation de la tension générée dans le muscle (contraction d'intensité plus grande). Lors d'un potentiel d'action, l'excitabilité de la cellule est totalement modifiée : durant un court laps de temps, la fibre nerveuse n'est absolument plus excitable. Cette période de temps s'appelle la « période réfractaire ». Cette dernière est le facteur qui limite alors le nombre d'influx produit par le motoneurone (Decherchi et al. 2003).

### 2.5.5 Recrutement des fibres musculaires sous électromyostimulation

Il convient de rappeler que lors d'un travail musculaire volontaire d'intensité croissante, les fibres musculaires de type I sont recrutées avant celles de type II. En effet le diamètre du motoneurone d'un réseau de fibres lentes est plus petit, ce qui facilite sa dépolarisation ; c'est le principe de Henneman<sup>21</sup>. Comme l'expliquent plusieurs auteurs dans leur article (Dehail et al. 2008 ; Feiereisen et al. 1997 ; Maffiuletti et al. 2010), le recrutement des fibres sous électrostimulation a dans un premier temps été expliqué comme étant simplement l'inverse du principe de Henneman. En effet les axones des motoneurones de fibres II ayant un diamètre plus grand, ils étaient plus facilement excitable par une source externe d'électricité. Cette théorie a notamment été soutenue dans plusieurs études (Cabric et al. 1988 ; Heyters et al. 1994 ; Trimble & Enoka. 1991, cités par Maffiuletti et al. 2010, p. 227).

<sup>21</sup> Cf. chapitre 2.1.4



Le principal bénéfice était de pouvoir sélectionner et entraîner un certain type de fibres (ici les fibres rapides).

Dans un deuxième temps, cette théorie a été remise en question et des études ont été menées dans le but d'éclaircir ce point (Crépon et al. 2007 ; Dehail et al. 2008 ; Feiereisen et al. 1997 ; Gregory & Bickel, 2005 ; Maffiuletti et al. 2010). Afin d'essayer de discriminer au mieux le recrutement des fibres musculaires, les auteurs se sont basés sur divers critères, dont voici les principaux : le degré d'excitabilité, la vitesse de conduction, le degré de fatigabilité (Thépaut-Mathieu, 1998).

Ils ont découvert que la contraction musculaire induite par l'électricité était caractérisée par une sollicitation métabolique élevée dans les zones superficielles du muscle, par rapport aux zones profondes. Cela prouve que le recrutement spatial s'opère superficiellement. Ce phénomène résulte de la propagation du courant électrique d'abord dans les tissus localisés sous l'électrode. Plus intense sera le courant, plus profond se fera le recrutement d'unités motrices (voir Fig.9).

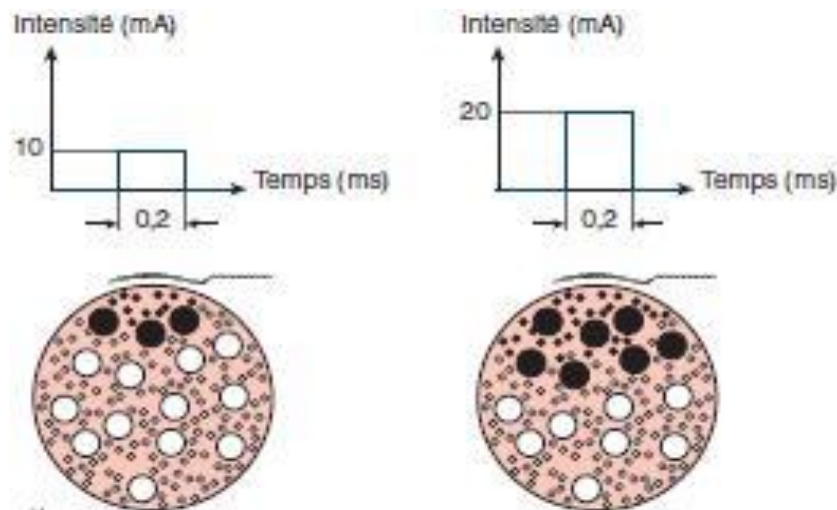


Fig. 9: recrutement spatial des fibres selon l'intensité du courant (Crépon et al. 2007. p. 7)

De plus, comparée à une contraction volontaire lors d'un développement de force, la contraction électro-induite provoque une sollicitation énergétique beaucoup plus importante. Cela n'est apparemment pas expliqué par une sollicitation accrue des fibres rapides (plus rapidement fatigable que les fibres lentes) sous électromyostimulation, mais par ces différents points :

- Sous électromyostimulation, la même population d'unités motrices est recrutée en continu durant l'intégralité de l'exercice, alors qu'en temps normal,

le système nerveux alterne de manière régulière le pool des unités motrices en activité ;

- La fréquence de stimulation utilisée est généralement proche de la fréquence maximale de décharge naturelle des unités motrices les plus rapides ;
- Lors d'un exercice physique volontaire, l'activation du muscle se fait de manière asynchrone ; au contraire l'électromyostimulation recrute les axones motoneuraux de manière synchrone (Crépon et al. 2007).

Selon Gregory & Bickel (2005) et Maffiuletti et al. (2010), il semble donc erroné de penser que le principe de recrutement des fibres musculaires sous électromyostimulation est simplement l'inverse de celui de Henneman. Les fibres rapides et les fibres lentes sont recrutées de manière non sélective aussi bien lors d'une basse que lors d'une haute intensité de stimulation. Il ne faut en outre pas oublier de prendre conscience de l'importance du placement et de la taille des électrodes, qui peuvent jouer un rôle prépondérant ; de petites électrodes tendent à concentrer le courant sur une zone ciblée du muscle, contrairement aux plus grandes.

## 2.6 Effets escomptés de l'électromyostimulation sur la récupération post-effort d'un muscle

Après un effort physique, les sportifs amateurs ou professionnels peuvent utiliser un appareil électrostimulateur dans le but d'accélérer la récupération du ou des muscles fatigués ou courbaturés. Les deux principaux effets attendus sont les suivants :

- La propagation de courants électriques dans le muscle provoque la contraction de ce dernier, ce qui accélère la circulation sanguine locale. Cela, à l'image d'une technique de récupération active comme un léger footing, permettrait alors d'éliminer plus rapidement les métabolites produits par les contractions répétées du muscle durant l'effort. Ce phénomène accélérerait la régénération neuromusculaire du muscle (Babault et al. 2011 ; Barnett, 2006 ; Lattier et al. 2004)
- La deuxième vertu de l'électromyostimulation se trouverait dans la réduction de la douleur musculaire post-effort. En effet le courant électrique stimulerait les fibres nerveuses sensorielles, ce qui causerait une inhibition sensitive au

niveau de la moelle épinière. Dans un autre mécanisme, ce même courant provoquerait la libération d'endorphines, neurotransmetteurs ayant une propriété analgésique (Babault et al. 2011 ; Crépon et al. 2007 ; DeSantana et al. 2008 ; Rushton, 2002 ; Tiidus, 2008).

### 2.6.1 Etat actuel de la recherche sur le sujet

Dans le cadre de ce travail, nous avons les moyens nécessaires de mettre au point un test pour lequel il s'agit de mesurer l'efficacité de l'électromyostimulation en tant que technique de récupération à moyen terme sur un muscle courbaturé. Plus précisément, nous avons l'opportunité de pouvoir mesurer la hauteur de saut, la force maximale et explosive (facteurs neuromusculaire ou physiologique) d'un groupe de muscles et la perception de la douleur chez des sujets. Ce sujet de recherche a déjà plusieurs fois été étudié par le passé, mais rares sont les travaux contenant des résultats significatifs nets et révélateurs. Surtout, les méthodes utilisées sont difficilement comparables, essentiellement concernant les paramètres utilisés.

Alors que pour Crépon et al. (2007) le plus efficace et confortable des courants électriques sollicités pour la récupération après des courbatures est un courant bidirectionnel, à impulsion rectangulaire, à durée d'impulsion brève et à basse voire très basse fréquence (de l'ordre de 2 à 50 Hz), il n'en est pas de même pour tous les auteurs ayant effectué des recherches sur le sujet. Dans leur étude Allen et al. (1999) ont utilisé des micro-courants avec des fréquences comprises entre 0.3 et 30 Hz (en anglais : MENS). Butterfield et al. (1997) ont eux sollicité des courants à haute fréquence (jusqu'à 120 Hz) dans leurs recherches (en anglais : HVPC). En 2004 McLoughlin et al. ont fait appel à un courant unidirectionnel à haute fréquence (120 Hz), abrégé en anglais MHVS. Un autre type de courant est plus régulièrement utilisé dans les études sur le sujet : la stimulation électrique transcutanée (Denegar & Perrin, 1992 ; DeSantana et al. 2008 ; Vanderthommen et al. 2007). Le TENS (en anglais) est un courant à basse ou haute fréquence et à durée d'impulsion longue (200  $\mu$ s). Enfin, un des types de stimulations les plus employés ces dernières années (Lattier et al. 2004 ; Tessitore et al. 2007, 2008) se trouve être la stimulation électrique à basse fréquence et à durée d'impulsion élevée (250  $\mu$ s) (en anglais : LFES).

Le schéma ci-dessous résume de manière claire et simplifiée les effets connus et attendus à l'application de ces différents types de courants électriques.

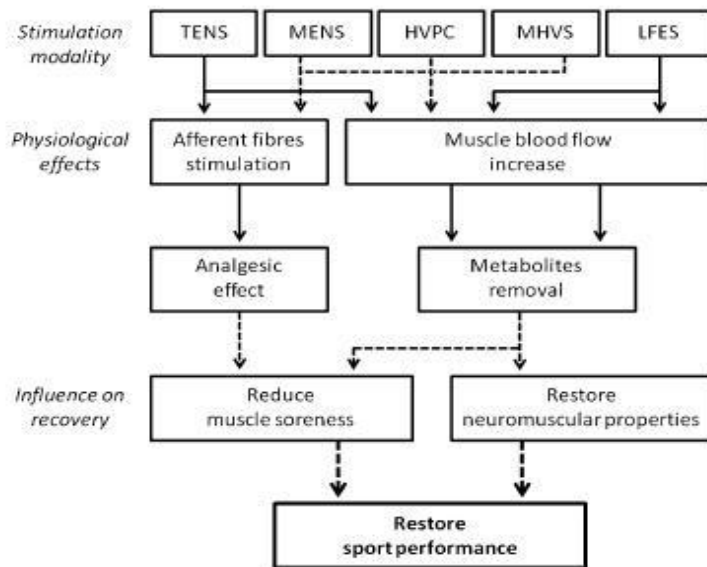


Fig. 10: aperçu schématique des différents types de courants appliqués et leurs effets connus (flèches pleines) et attendus (flèches traitillées) (Babault et al. 2011. p. 2503)

Cependant entre les effets à ce jour connus et attendus, quels sont ceux qui ont été testés et complètement approuvés ?

S'agissant de la récupération des paramètres neuromusculaires (dans notre cas la force maximale), force est de constater que dans toutes les principales études menées sur le sujet, l'effet escompté n'apparaît pas. En effet, dans leurs études, Vanderthommen et al. (2007,2010) n'ont trouvé aucune différence entre une technique de récupération par stimulation électrique à basse fréquence (LFES) et une technique de récupération active ou même passive. Denegar & Perrin (1992) partagent la même conclusion, malgré l'application dans leur cas d'une stimulation électrique transcutanée (TENS).

Ces études-là n'appliquaient ces différentes techniques de récupération qu'une seule fois et immédiatement après la session d'exercices fatigants. McLoughlin et al. (2004) ont de leur côté appliqué une séance de stimulation, à l'aide d'un courant unidirectionnel à haute fréquence (MHVS), à huit reprises dans les cinq jours suivant une session d'exercices fatigant les muscles fléchisseurs du coude. Mais de nouveau, les résultats ne sont pas significatifs. Butterfield et al. (1997), Lattier et al. (2004), et Martin et al. (2004, cité par Babault et al. 2011, p. 2504) ont tous fait leurs

recherches sur les muscles extenseurs du genou. Les premiers ont utilisé des courants à haute fréquence (HVPC), alors que Lattier et son équipe ont eu recours à des stimulations électriques à basse fréquence. Dans tous les cas, la méthode de récupération par stimulation électrique n'était pas significativement meilleure que les méthodes actives ou passives sur ce groupe de muscles. Dans de très rares cas, comme dans les études de Vanderthommen et al. (2007) et Beaven et al. (2013), des résultats démontrent que le taux de créatine kinase dans le sang tend à diminuer légèrement durant la période de récupération grâce à l'utilisation de l'électromyostimulation. Cette diminution peut être perçue comme une réduction de la réponse inflammatoire qui accompagne les lésions musculaires.

Dans un second registre, l'application d'un courant électrique aurait la faculté de réduire la sensation de douleur provoquée par les courbatures. Encore une fois plusieurs types de courant sont utilisés, cependant dans la plupart des cas les résultats sont contradictoires.

Dans leur étude en 1992, Denegar & Perrin affirment qu'une stimulation électrique transcutanée (TENS) à haute fréquence est plus efficace qu'une technique de récupération passive et en conditions « placebo ». Quatre ans plus tard Craig et al. (1996) contredisent l'étude précédente en découvrant que le TENS, utilisé à haute ou basse fréquence sur les muscles fléchisseurs du coude, n'a pas plus d'effet qu'une simple récupération passive. Dans leur revue, DeSantana et al. (2008) font la synthèse des dernières études (2005 à 2008) menées sur le traitement de toutes sortes de douleurs par le TENS. Ils restent convaincus que les paramètres de stimulation sont un facteur prépondérant, principalement l'intensité ; elle devrait être élevée (intensité maximum tolérée par le patient). Selon Allen et al. (1999), l'utilisation de MENS dans les jours suivants l'induction de courbatures dans le muscle du biceps brachii ne semble pas accélérer ou modifier la réduction de la douleur. Au contraire ce type de courant induit un effet analgésique temporaire selon Denegar et al. (1992, cité par Babault et al. 2011, p. 2505) entre vingt-quatre et quarante-huit heures après l'induction des courbatures. Butterfield et al. (1997) concluent dans leur étude que le HVPC est tout autant inefficace que le MENS, alors que McLoughlin et al. (2004) affirment que le MHVS a un effet notoire, à condition qu'il soit appliqué tôt et à de nombreuses reprises après l'induction des courbatures. Enfin le LFES semble avoir un manque d'effets positifs dans plusieurs études (Martin

et al. 2004, cité par Babault et al. 2011 ; Tessitore et al. 2008 ; Vanderthommen et al. 2007, 2010). Seule une étude de Tessitore et al. (2007) relève un effet positif sur la diminution de la douleur.

Tous ces résultats contradictoires semblent être la conséquence d'une grosse hétérogénéité dans les méthodes utilisées. Outre l'application de différents types de courant électrique (avec une intensité souvent négligée), les exercices induisant les courbatures sont rarement semblables et sont appliqués sur différents groupes musculaires. De plus, certaines études suivent un protocole précis dans la manière de fatiguer les muscles ou de leur induire des courbatures (McLoughlin et al. 2004 ; Vanderthommen et al. 2010), alors que d'autres réalisent leurs expériences en situations sportives habituelles (Heyman et al. 2009 ; Tessitore et al. 2008). Enfin, l'évaluation de la perception de la douleur est un paramètre subjectif, néanmoins c'est dans ce domaine que les effets les plus positifs ont été trouvés. Selon Babault et al. (2011), l'électromyostimulation ne comble pas les attentes d'un point de vue neuromusculaire, mais apparaît comme étant une bonne alternative à une méthode de récupération post-effort lorsque la douleur est le facteur limitant le plus important.

Sur la base de la partie théorique ainsi que des résultats et conclusions exposés dans les études susmentionnées, il va s'agir à présent de mesurer les effets de l'application de l'électrostimulation comme moyen de récupération sur un muscle courbaturé après un effort intense et inhabituel, d'un point de vue **physiologique**, mais aussi **perceptif** (sensation de douleur). Ceci est rendu possible principalement grâce à la disponibilité d'une population de trente individus et à l'utilisation de moyens d'évaluation et d'instruments de recherche mis à disposition par l'Université de Fribourg et décrits dans la partie méthodologique qui suit.

## 3. Méthodologie

### 3.1 Population de l'étude

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de retenir des individus de sexe masculin, moyennement sportifs dont le volume de pratique sportive se situe entre deux et huit heures d'activité physique par semaine. L'âge des participants est également un critère qui a été pris en considération (> 18 et > 30 ans). D'autres conditions étaient liées au respect du protocole :

- Le sujet n'a pas réalisé d'activité physique intense et/ou inhabituelle dans les dernières vingt-quatre heures ;
- il n'a pas ressenti de quelconques courbatures dans les mollets dans les deux dernières semaines ;
- il n'est pas sous l'emprise de suppléments ou de médicaments administrés dans le but de lutter contre de quelconques courbatures et/ou de favoriser une régénération musculaire accélérée ;
- il n'a pas été malade, ni atteint par un virus dans les quinze derniers jours, y compris le jour du test ;
- enfin, il ne ressent aucune douleur musculaire susceptible de nuire au bon déroulement du test.

Les critères et les conditions à respecter étaient vérifiés le premier jour du test par un document officiel issu de Swiss Olympic Medical Centers : le questionnaire de préparation d'avant test<sup>22</sup>. Il convient de préciser que cette liste de contrôle a été complétée au niveau du dernier point de son contenu, dans l'optique de pouvoir examiner toutes les conditions préalablement citées.

Les sujets de l'expérience étaient scindés en deux groupes : une moitié des individus formait le groupe « Contrôle » (C) et l'autre constituait le groupe « Expérimental » (E).

Concernant la première condition susmentionnée, cinq sujets avaient effectué un effort la veille du premier jour du test. Cependant dans tous les cas, l'effort était habituel et n'était pas particulièrement intense ; les sujets en question ne

---

<sup>22</sup> Cf. annexe 11.1

ressentaient donc aucune fatigue accrue ou courbature quelconque le premier jour du test. En outre, personne n'a souffert de courbature dans les quinze jours précédents le premier jour du test, à l'exception de quatre sujets. Après discussion avec les quatre intéressés, il s'est avéré que ces courbatures n'ont pas duré plus de vingt-quatre heures et qu'elles consistaient en de très légères douleurs musculaires diffuses dans les gros muscles des membres inférieurs.

Trois sujets ont annoncé avoir subi un léger rhume dans les deux dernières semaines avant le début du test, alors qu'un sujet a été victime d'une gastroentérite. Ce dernier sujet a toutefois signalé que le processus de guérison était terminé depuis une semaine et qu'il avait déjà recommencé la pratique d'activités physiques durant les quelques jours précédant le début du test. Enfin, trois sujets ont déclaré avoir de légers maux de dos ou de cheville le premier jour du test ; ces douleurs ne les ont pas empêchés d'effectuer le test de manière optimale.

Après vérification des conditions de base, aucun sujet n'a donc été écarté du test. Tous étaient aptes à effectuer l'entier du test dans les meilleures dispositions.

### 3.2 Protocole de test

Afin que l'organisation et le déroulement du test se passent au mieux et que le timing prévu soit respecté, un tableau exposant le protocole en détail a été élaboré. Il a été remis et décrit à chaque sujet en tout début de test (voir Tab. 1).

Tab. 1: présentation du protocole en détail

Méthodologie		
Planification	Explications/informations	date
Les sujets n'ont pas effectué d'activité physique intense durant les 24h avant le début du test. Ils n'ont également eu aucune courbature au mollet dans les deux semaines précédant le test. Lieu : labo et salle de tests du fitness de Périlles II		
1 ère étape	1) Accueil des sujets, transmission d'informations utiles, Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire)	Date à convenir
	2) Mesure des forces sur les mollets	
	3) échauffement protocolé de 4' sur tapis de course	
	4) 10' de course à pied en marche arrière sur tapis de course incliné de 14%, à une vitesse de 8 km/h	
	5) 10' de repos et évaluation perceptive de la douleur (questionnaire)	
	6) Mesure des forces sur les mollets	
	7) Explications de la méthodologie à adopter pour les deux groupes (E et C)	
	8) Début de la phase de récupération pour les deux groupes (1 <sup>ère</sup> séance d'EMS le	



	soir même)	
2ème étape	1) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C	1 jour après le test physique (24h)
	2) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	
3ème étape	1) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C.	3 jours après le test physique (72h)
	2) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	
4ème étape	1) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C.	5 jours après le test physique (120h)
	2) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	

A la fin du premier jour du test, les sujets des deux groupes se sont vus remettre un journal de bord, dont le contenu leur a permis de les accompagner et les guider tout au long des six jours du test. Ce journal comprenait notamment les rappels quant aux heures d'applications du courant électrique ainsi que trois conditions à prendre en compte, en vue de ne pas fausser les résultats finaux de l'étude. Il y figurait également une marche à suivre aidant les sujets du groupe E à disposer correctement de l'appareil électro stimulateur<sup>23</sup>

Les jours un, trois et cinq suivant le premier jour du test, tous les sujets revenaient au laboratoire à la même heure ; celle à laquelle ils avaient débuté le test du premier jour. La disponibilité limitée de certains sujets pendant la semaine du test a causé quelques modifications de l'heure de certains rendez-vous. En effet une marge d'erreur de plus ou moins trente minutes a été observée dans quelques cas. Toujours selon la disponibilité des sujets, les tests se sont déroulés entre dix et vingt et une heures, généralement du lundi au samedi.

### 3.3 Evaluations et instruments de recherche

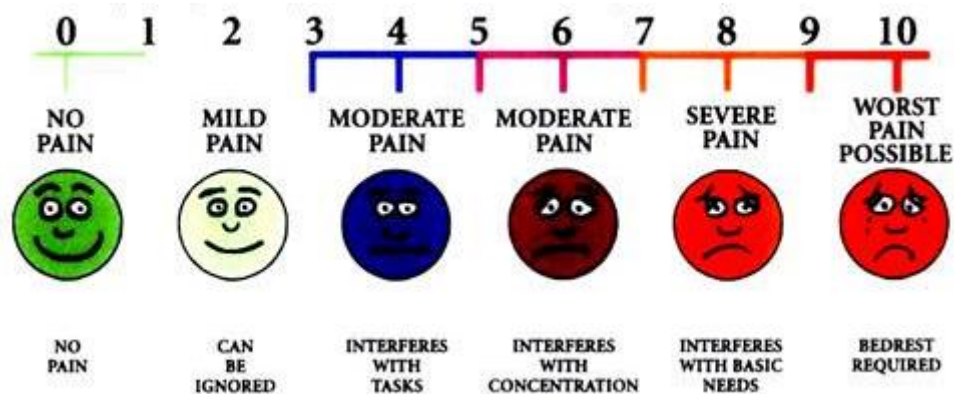
#### 3.3.1 Questionnaire perceptif de la douleur

Après avoir reçu, pris connaissance et rempli les documents nécessaires au test, les sujets ont dû remplir une première fois un questionnaire relatif à la perception de la sensation de douleur ressentie dans les mollets.

La douleur est une expérience subjective et multidimensionnelle propre à chaque individu ; cette dernière peut avoir des aspects sensoriels, émotionnels et cognitifs. Il existe différents moyens de la mesurer, mais elle reste néanmoins relativement

<sup>23</sup> Cf. annexes 11.3, 11.4 et 11.5

approximative selon la personne effectuant l'évaluation. Dans le cas de notre étude, plusieurs types d'échelles ont été combinés afin de tenter d'être le plus explicite et le plus précis possible lors de l'évaluation de la perception de la douleur. L'instrument ci-dessous a été principalement réalisé sur la base d'un document appelé «Universal Pain Assessment Tool »<sup>24</sup> et modifié dans le but d'être le plus clair possible s'agissant de l'état dans lequel se trouvent les mollets des sujets.



En français :	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Aucune douleur	Légère douleur lors de mouvement (spécialement marche), pouvant être ignorée		Douleur modérée, en mouvement, interférant avec les tâches	Douleur forte, interférant avec la concentration lors de simples mouvements		Douleur sévère, interférant avec les besoins de base lors de simples mouvements				La pire douleur possible, requérant un repos total, sans bouger.

Cet instrument permet au sujet de communiquer l'intensité de sa douleur, au moyen de plusieurs échelles. Ici l'échelle numérique, allant de un à dix et permettant au sujet de donner une note sur la douleur ressentie, est combinée avec une échelle verbale simple. Cette dernière permet un ressenti de la douleur par paliers. Cet instrument est complété par l'échelle des visages « smilies » et une description de la tolérance à l'activité pour chaque palier.

<sup>24</sup> Disponible sur : [http://www.pamz.com/Physical\\_Assessment/assessment.htm](http://www.pamz.com/Physical_Assessment/assessment.htm)

### 3.3.2 Instruments de mesure de la force du mollet

Afin de mesurer le plus précisément possible les différentes variables liées à la force maximale qu'émet la contraction simultanée des muscles gastrocnémien et soléaire d'un sujet, une salle de laboratoire dans le bâtiment de Physique de Pérolles II à l'université de Fribourg met à disposition deux instruments de mesure (voir Fig. 11).



Fig. 11: représentation du muscle du soléaire et des deux chefs du muscle gastrocnémien

Le premier instrument est un dispositif complexe, spécialement fabriqué par le Prof. Dr. Wolfgang Taube et son équipe. Il s'agit d'un outil conçu pour mesurer, entre autres, la force maximale de contraction du mollet d'un individu.

**Description de la position à adopter en vue d'une utilisation adéquate de l'instrument :** comme il est visible sur l'image ci-contre (voir Fig.12), le sujet se tient les fesses appuyées contre une table avec la jambe (droite) d'appui au sol. La jambe gauche est déposée sur le dispositif de manière à placer le talon et le bout du pied aux endroits prévus à cet effet. Durant toute la prise de mesures le sujet appuie ses bras et le haut de son corps sur le montant métallique de l'instrument afin d'éviter que ce dernier ne bouge. Enfin pour une meilleure stabilité de la jambe dont le pied est déposé sur l'instrument, une ceinture immobilise cette dernière.

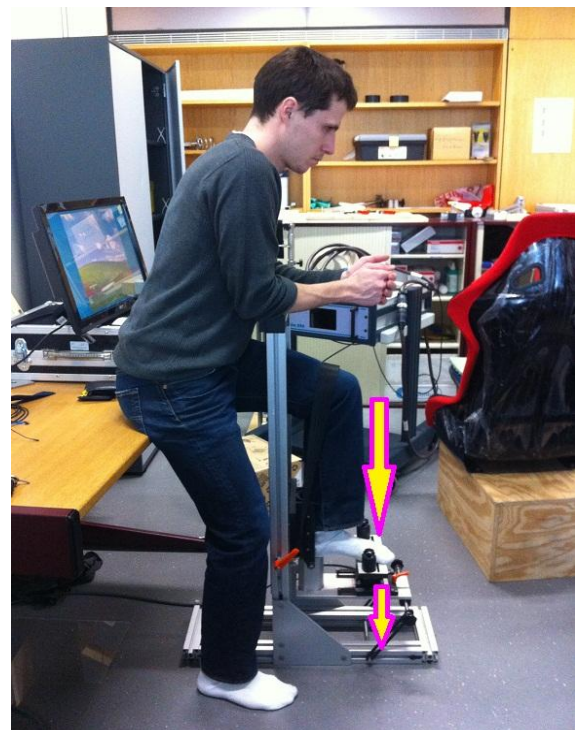


Fig. 12: position à adopter sur l'instrument

**Déroulement de la prise de mesures :** à l'avertissement sonore de l'examineur, le sujet effectue de toutes ses forces une flexion plantaire du pied gauche déposé sur l'instrument pendant deux à trois secondes. Cette opération est répétée à cinq

reprises, espacées les unes des autres de dix secondes de repos. Une fois cette séquence terminée, le sujet en fait de même avec sa jambe droite.

### Variable calculée lors de l'exécution d'une flexion plantaire

- Force maximale (Force max) en Newton (N) de la jambe forte et de la jambe faible
- Force explosive (Force exp) en Newton par milliseconde (N/ms) de la jambe forte et de la jambe faible

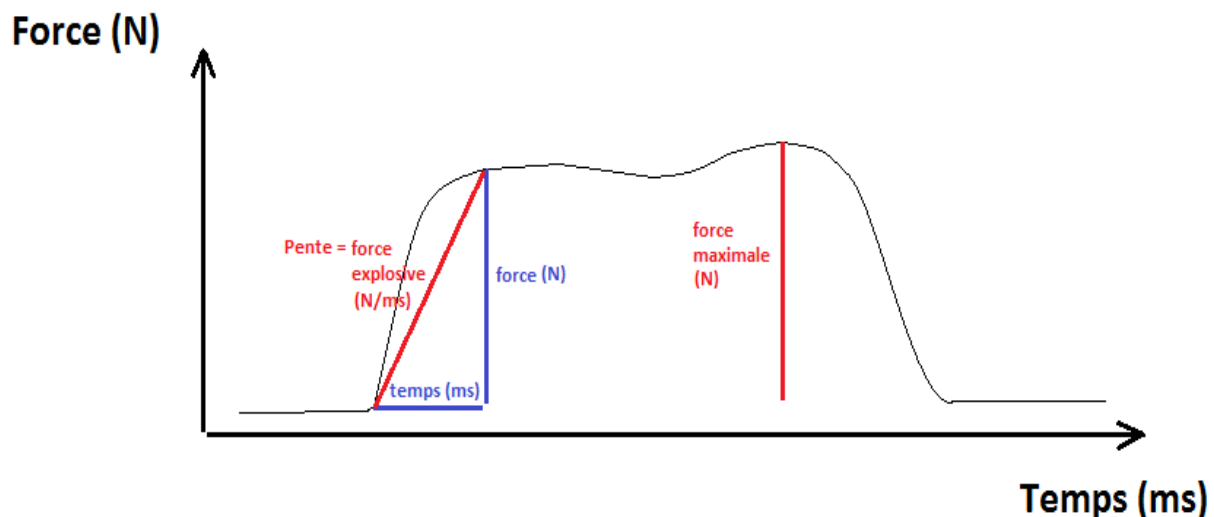


Fig.13: graphe représentant l'évolution de la force en fonction du temps (trait noir) calculée lors d'une exécution de la tâche demandée sur l'instrument de recherche conçu pour mesurer la force du mollet d'un individu. En rouge, les deux variables mesurées sur cet instrument : la force explosive (qui correspond au degré d'inclinaison de la pente) et la force maximale émises par le mollet du sujet.

Le second instrument de recherche, complémentaire au premier, est une plateforme de force de forme rectangulaire sur laquelle un individu peut procéder à plusieurs types de sauts. Cet outil, au nom scientifique de OR6-7 et d'une surface de 508/464 mm, a été conçu par Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA. Il permet de mesurer de nombreuses variables. Les plus importantes sont les suivantes : Hauteur (cm), Vitesse (cm/s), Force (N) et Force explosive (N/ms).

**Description de la technique de saut à adopter en vue d'une utilisation adéquate de l'instrument :** le sujet effectue un saut de détente (Counter Movement Jump en anglais). Pour cela, il commence par se tenir debout et immobile, le regard dirigé vers l'avant et les mains posées sur les hanches. Au moment de débiter l'exécution du saut, le sujet prend un certain élan en fléchissant les genoux, puis les tend

énergiquement et saute en gardant une trajectoire verticale. Ses mains restent posées sur ses hanches du début à la fin du saut. Le but, dans notre cas, étant d'aller chercher la hauteur maximale de saut. Le sujet amortit la réception de son saut et se replace dans sa position initiale (voir Fig. 14).



Fig. 14: déroulement d'un saut de détente (CMJ)

**Déroulement de la prise de mesures :** à l'avertissement sonore de l'examineur, le sujet effectue un saut de détente. Cette opération est répétée à cinq reprises, espacées les unes des autres de cinq secondes.

**Variable calculée lors de l'exécution d'un saut:**

- Hauteur en mètre (m), calculée à partir du temps de vol en milliseconde
- Force maximale (Force max) en Newton (N)
- Force minimale (Force min) en Newton (N)

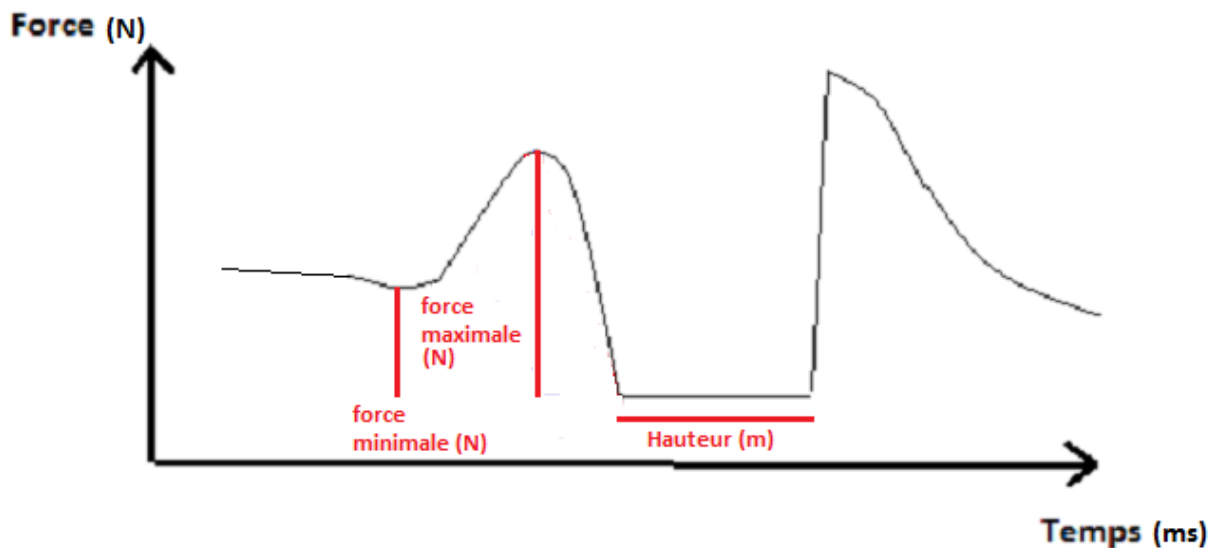


Fig.15: graphe représentant l'évolution de la force en fonction du temps (trait noir) lors de l'exécution d'un saut de type CMJ sur la plateforme de force. En rouge, les trois variables mesurées sur cet instrument : la force minimale, la force maximale et la hauteur de saut (calculée à partir du temps de vol en milliseconde).

Toutes les données étaient traitées et enregistrées par le biais d'un programme informatique (Imago, conçu par la Compagnie Pfitec). Elles étaient enregistrées avec une fréquence de deux cents Hertz et étaient stockées dans la mémoire informatique des deux ordinateurs utilisés dans le cadre du test.

*Remarque :* pour obtenir des variables précises et valides lors des tests, l'examineur expliquait et démontrait, ou simplement rappelait la technique à adopter au sujet avant chaque exécution sur les deux instruments susmentionnés. Après un essai « à vide » réussi de la part du sujet, ce dernier s'installait et débutait la prise de mesure avec un avertissement sonore de l'examineur comme point de départ.

### 3.3.3 Induction des courbatures sur le tapis de course

L'évaluation perceptive de la douleur ainsi que les prises des différentes mesures étaient effectuées dans le laboratoire. Pour parvenir à induire des courbatures suffisamment intenses dans le mollet du sujet, il a fallu avoir recours à un protocole de course spécifique, qui ne pouvait être appliqué que sur un tapis de course à la salle de fitness de Pérolles II. Ce protocole, utilisé en 2007 par Law & Herbert et proposé par le co-conseiller de ce travail Alain Rouvenaz, a été testé à plusieurs reprises par l'examineur avant d'être validé et utilisé sur les sujets.



**Description du dispositif :** la partie arrière d'un tapis de course de la marque « Kettler Traveller » a été surélevée à l'aide d'un step et d'une planche en bois dans le but de créer une pente égale à quatorze pourcent. Une fois le dispositif prêt à l'emploi, le sujet y prenait place et pouvait débiter sa course **en marche arrière**.

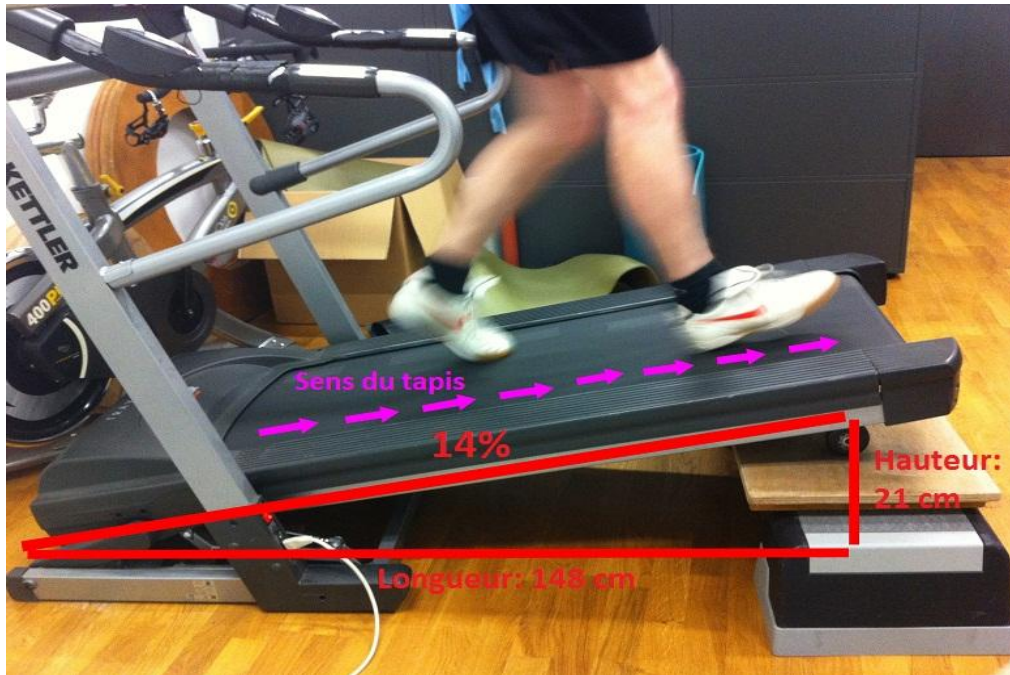


Fig. 16: aperçu du dispositif en situation de test

Dans cette tâche, chaque pas exécuté vers l'arrière et en descente force le sujet à gérer et freiner son mouvement dans l'optique de courir sans arrêt et à vitesse constante. Le sujet exerce donc un travail excentrique ; il y a mise en tension durant l'allongement du muscle du gastrocnémien. Il s'est avéré que la partie supérieure du muscle était la plus touchée par les courbatures les jours suivant l'exécution de la tâche (voir Fig. 17).

**Déroulement du test de course :** le sujet effectuait un échauffement de course protocolé ; il exécutait une course de quatre minutes en marche avant sur un tapis de course réglé à la vitesse de huit km/h. Puis, sans transition notable, il entamait la course en marche arrière d'une durée de dix



Fig. 17: zone du mollet la plus touchée par les courbatures

minutes à une vitesse de huit km/h sur le dispositif susmentionné.

*Remarque* : comme l'exercice à réaliser sur le dispositif était inhabituel, voire inconnu, l'examineur procédait à une mise en route progressive du tapis de course dans un but d'adaptation du sujet. Il augmentait la vitesse de course du sujet durant une minute et trente secondes jusqu'à atteindre la vitesse de croisière de huit km/h.

### 3.4 Récupération par électromyostimulation

Cette étude n'aurait pas pu être mise sur pied sans la participation de la société Compex Médical SA. C'est en effet elle, par l'intermédiaire de l'un de ses représentants M. Donato Stefanelli, qui a fourni les appareils électro stimulateurs permettant au groupe E de cette étude de suivre une récupération active. Il convient de présenter cette société en quelques lignes.

Cette marque, d'origine suisse, est active dans les domaines de la rééducation, du traitement de la douleur et de l'entraînement sportif depuis plus de vingt ans. Avec les années, l'électrostimulation, produit phare de la société, s'est approprié une place de choix aux côtés des professionnels de la santé et des sportifs les plus exigeants. Outre la rééducation et le traitement de la douleur, l'électrostimulation est une technique d'entraînement utilisée pour la préparation physique, la prévention des blessures et la **récupération musculaire**.

#### 3.4.1 Modèles d'appareil d'électrostimulation et récupération active

Les derniers appareils électro stimulateurs en vogue de la marque Compex proposent un certain nombre de programmes dans un but de récupération musculaire. Les modèles prêtés par la société étaient le « Compex Mi-Sport » et le « Compex Performance ».





Fig. 18: modèles des appareils prêtés par la firme Compex

Sous la fonction « Récupération » de ces appareils, quatre programmes étaient à choix :

- 1) Récupération active
- 2) Massage relaxant
- 3) Massage régénérant
- 4) Décrassage

Après lecture des présentations et des objectifs de ces différents programmes de récupération dans le manuel d'utilisation officiel<sup>25</sup> des appareils de la société, l'utilisation de la fonction « Récupération active » se révélait être la plus appropriée dans le cadre de cette étude. C'est ce qu'a confirmé par la suite M. Donato Stefanelli.

Voici les effets bénéfiques attendus par l'utilisation d'un tel programme selon la société :

- 1) Le débit sanguin local augmente fortement, ce qui permet un meilleur drainage des toxines<sup>26</sup> musculaires.
- 2) Il y a augmentation de la production d'endorphine, une substance naturelle aux propriétés antalgiques, provoquant une réduction des douleurs musculaires.

<sup>25</sup> Disponible sur : <http://www.electrostimulateurs-manuels.fr/manuels-compex/manuels-compex.php>

<sup>26</sup> Métabolites produits par les contractions répétées du muscle durant l'effort

- 3) Réduction de la tension musculaire par un effet relaxant des fibres musculaires.

Compex Médical SA rajoute que, à l'inverse des programmes de renforcement musculaire, le programme de récupération active de leurs appareils d'électrostimulation n'engendre pas de puissantes contractions ; il provoque des secousses musculaires élémentaires induisant une sensation de massage.

### 3.4.2 Paramètres de la séance d'électromyostimulation

**L'intensité** du courant électrique était totalement gérée par le sujet lui-même du début à la fin de la séance. Toujours selon le manuel officiel de la marque, le sujet devait veiller à maintenir des intensités de stimulation aptes à fournir des secousses musculaires visibles et bien prononcées<sup>27</sup>. L'examineur complétait cette consigne en précisant au sujet qu'il pouvait réguler l'intensité selon sa propre tolérance à la douleur et au bien-être.

**La fréquence** émise par l'appareil électro stimulateur dans le programme de récupération évolue au cours de la séance. Elle débute à une valeur de neuf Hertz, puis au fil des minutes ralentit jusqu'à obtenir une valeur de un Hertz en fin de séance.

**Les électrodes sont placées** sur les points moteurs des muscles. Dans notre cas ce sont les endroits du muscle les plus touchés par les courbatures, là où la douleur se fait le plus ressentir (Vanderthommen & Crielaard ; Ziltener & Chantraine, 1997). Gondin et al. (2011) précisent également qu'il faut être attentif à ne pas appliquer les électrodes sur d'autres muscles (antagonistes) ou des



Fig. 19: aperçu de la position des électrodes sur les mollets

---

<sup>27</sup> Les termes « visibles » et « bien prononcées » signifient que de l'extérieur le sujet apercevait le mouvement de contraction de son mollet et devait ressentir une contraction globale, c'est-à-dire de l'entier du muscle du gastrocnémien

tendons. Un schéma indiquant la connexion ainsi que la position des électrodes sur les mollets était représenté sur les documents remis aux sujets du groupe E<sup>28</sup>.

### 3.4.3 Protocole de la séance d'électromyostimulation et de la période de récupération passive

A l'issue du premier jour du test, on expliquait et démontrait aux sujets du groupe E la méthodologie à adopter en vue d'accomplir une récupération active conforme au protocole. Il leur était demandé de réaliser une séance d'électromyostimulation avec le programme « récupération active » le jour même du test initial ainsi que les cinq jours suivant celui-ci, à l'image des études réalisées par Butterfield et al. (1997) et McLoughlin et al. (2004). En effet ces auteurs et leur équipe ont trouvé dans leur étude un effet notoire sur la récupération de la force maximale et sur la diminution de la douleur, à condition d'appliquer le courant électrique à plusieurs reprises dans les jours suivant l'induction des courbatures.

L'examineur veillait à ne pas oublier de leur communiquer oralement les trois conditions à prendre impérativement en compte dans le but de suivre le protocole de récupération active:

- 1) Les sujets étaient priés de n'avoir recours à aucun autre moyen de récupération que celui qui leur avait été imposé pour toute la durée de la phase de récupération.
- 2) La séance d'électromyostimulation devait être effectuée à la même heure chaque jour dans la mesure du possible. La marge d'erreur tolérée était d'une heure.
- 3) Lors des jours un, trois et cinq suivant le test initial sur le tapis de course, la séance d'électromyostimulation devait être effectuée **avant** le rendez-vous au laboratoire avec l'examineur.

Ces trois conditions figuraient sur les documents remis aux sujets du groupe E à la fin du premier jour du test, à la suite du journal de bord<sup>29</sup>.

**Positionnement du corps durant l'électromyostimulation** : comme le programme « Récupération active » de l'appareil induit de simples secousses musculaires, il est

---

<sup>28</sup> Cf. annexe 11.5

<sup>29</sup> Cf. annexe 11.4

stipulé que le sujet peut se positionner de la manière la plus confortable qui soit durant toute la durée de la séance (soit vingt-quatre minutes et vingt secondes, un temps prédéfini par l'appareil). Il doit néanmoins faire attention à laisser son mollet au repos durant toute la durée de la séance. Cette dernière a donc été réalisée généralement en position assise ou couchée sur le ventre.

Les sujets du groupe C étaient, eux, informés du comportement à adopter concernant la phase de récupération passive. Ils étaient priés d'appliquer la première des trois conditions susmentionnées pendant toute la durée du test.

### 3.5 Traitement et analyse statistique des données

A l'issue des tests, toutes les données numériques ont été relevées et retranscrites dans un fichier Excel. Les valeurs exprimées dans l'étude sont des moyennes. Dans un premier temps, une analyse des variances à un facteur (ANOVA) a été utilisée pour évaluer les changements dans le temps entre les deux variables dépendantes (récupération passive ou groupe C versus récupération avec l'électromyostimulation ou groupe E). Puis, pour chaque variable dépendante, les différences entre deux valeurs moyennes obtenues à tout point dans le temps entre les deux groupes étaient examinées grâce à l'utilisation du test-t de Student (bilatéral). Dans tous les cas l'indice  $p < 0.05$  était considéré comme statistiquement significatif, alors que  $p < 0.10$  représentait une tendance.

## 4. Résultats

### 4.1 Résultats de la force maximale sur la jambe forte

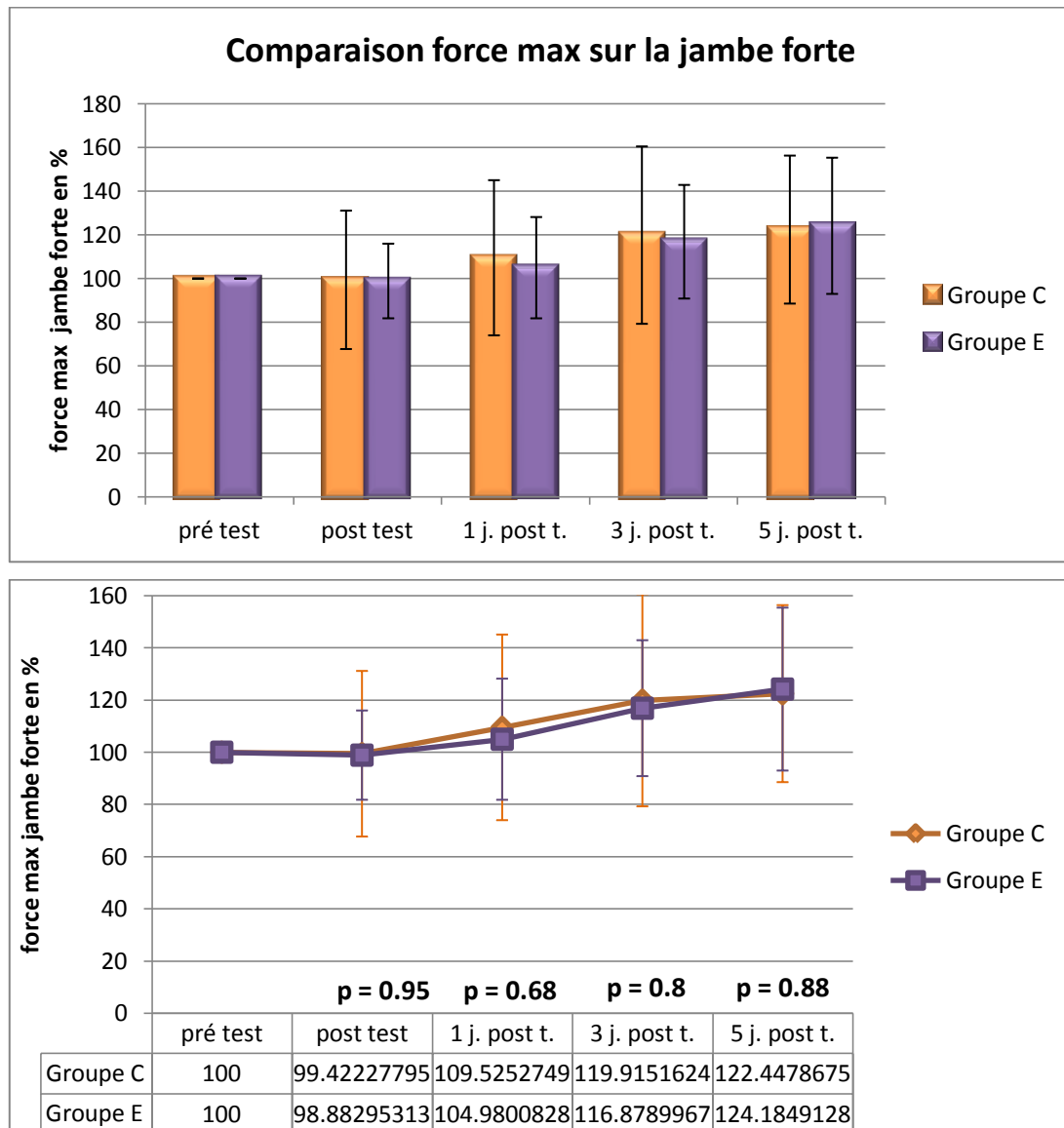


Fig. 20: représentations graphiques des résultats de la variable "force max jambe forte" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Pour la variable « force max sur la jambe forte », l'indice « p » élevé de l'analyse des variances (0.85) démontre que l'on est loin de relever une différence statistique dans le temps entre les courbes du groupe C et E (Fig. 20 p. 45). Elles sont presque identiques et se superposent sur la grosse majorité du graphe. La courbe du groupe C se distingue de celle du groupe E à la hauteur des stades trois et quatre du test, là où l'indice « p » du test de Student est égal à 0.68 et 0.8 respectivement. Cependant une différence aussi minime entre les valeurs (C = 109.52 ± 35.5 % ; E = 104.98 ±

23.2 % et C = 119.91 ± 40.6 % ; E = 116.87 ± 26 %) ne laisse place à aucune significativité statistique, ni même à une tendance.

Remarque : pour cette variable et les trois prochaines, l'unité de l'axe vertical des graphes est en « pourcent » de la force maximale (N) ou explosive (N/ms) du stade pré test, étant donné que les deux groupes n'avaient pas les mêmes forces maximales et explosives moyennes pour les deux jambes avant l'induction des courbatures.

## 4.2 Résultats de la force maximale sur la jambe faible

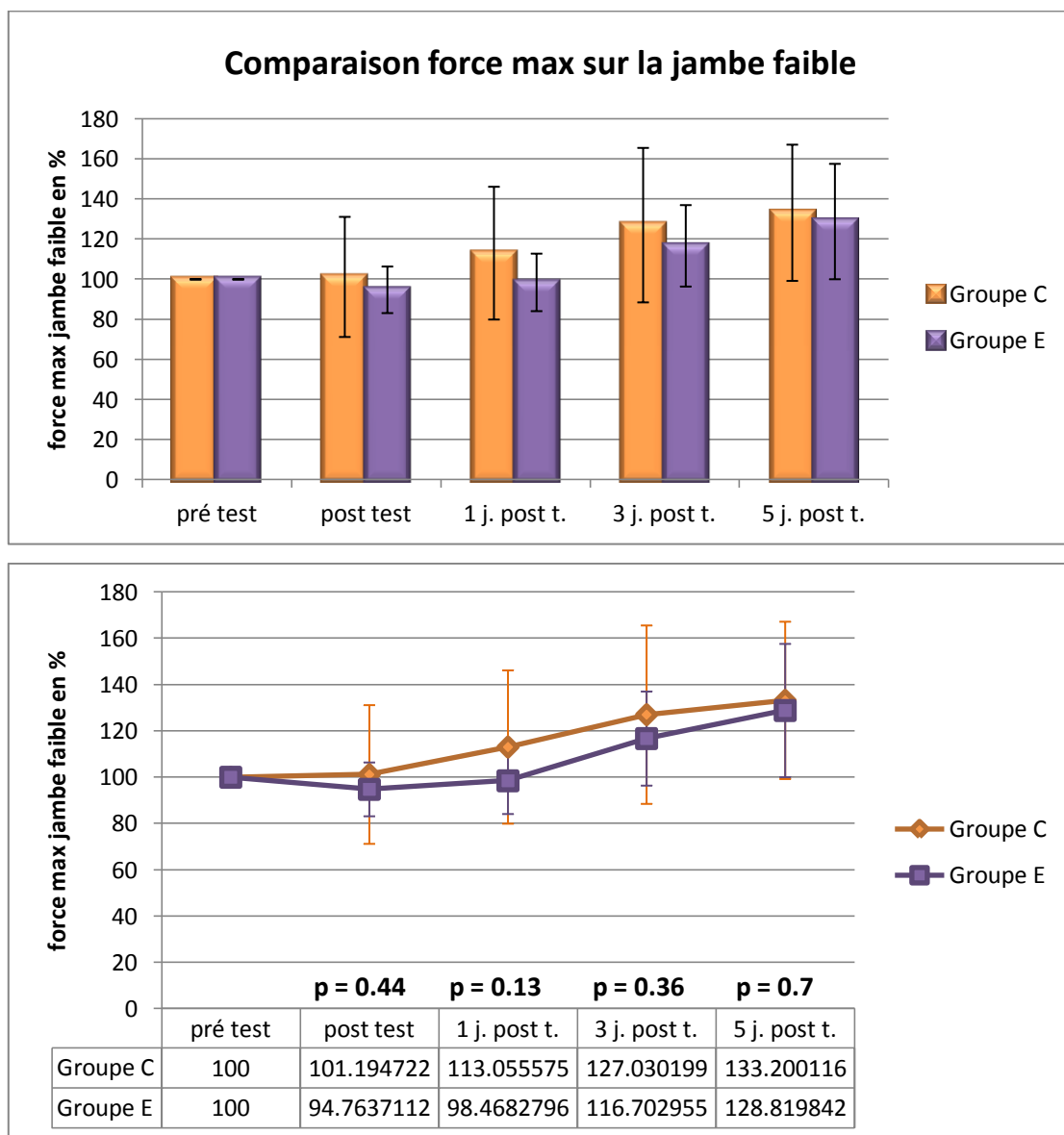
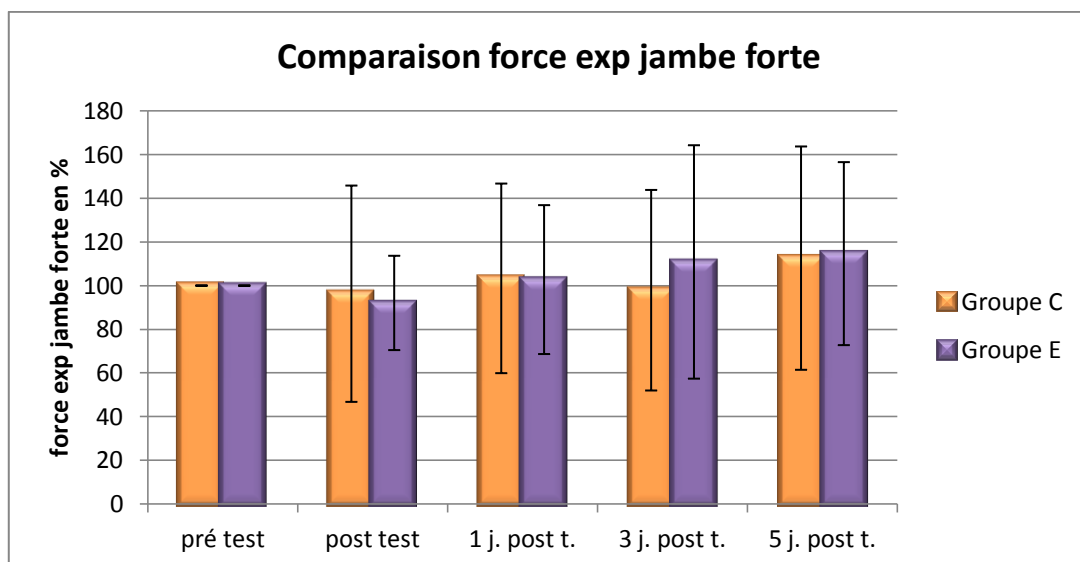


Fig. 21: représentations graphiques des résultats de la variable "force max jambe faible" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Concernant la variable « force max sur la jambe faible », l'analyse des variances ( $p = 0.46$ ) ne révèle pas plus de significativité statistique que dans le cas de la variable « force max sur la jambe forte », malgré une différence visuelle plus prononcée visible sur le graphe inférieur de la Fig. 21 (p. 46). En effet aux stades deux, trois et quatre du test le groupe C possède des valeurs sensiblement supérieures au groupe E, avec une différence maximum au stade trois ( $C = 113.05 \pm 33.1 \%$  ;  $E = 98.46 \pm 14.3 \%$ ), soit un jour après l'induction des courbatures. Néanmoins l'écart se rétrécit fortement à l'ultime stade du test ( $C = 133.2 \pm 33.9 \%$  ;  $E = 128.81 \pm 28.7 \%$ ). L'analyse des valeurs moyennes des deux groupes à chaque stade du test ne reflète aucune différence significative ; les indices « p » du test de Student sont compris entre 0.13 et 0.7.

Remarque : Dans les deux variables précédemment analysées, la moyenne de la force maximale du stade pré test est inférieure à la majorité des moyennes de la force maximale des stades suivants.

### 4.3 Résultats de la force explosive sur la jambe forte



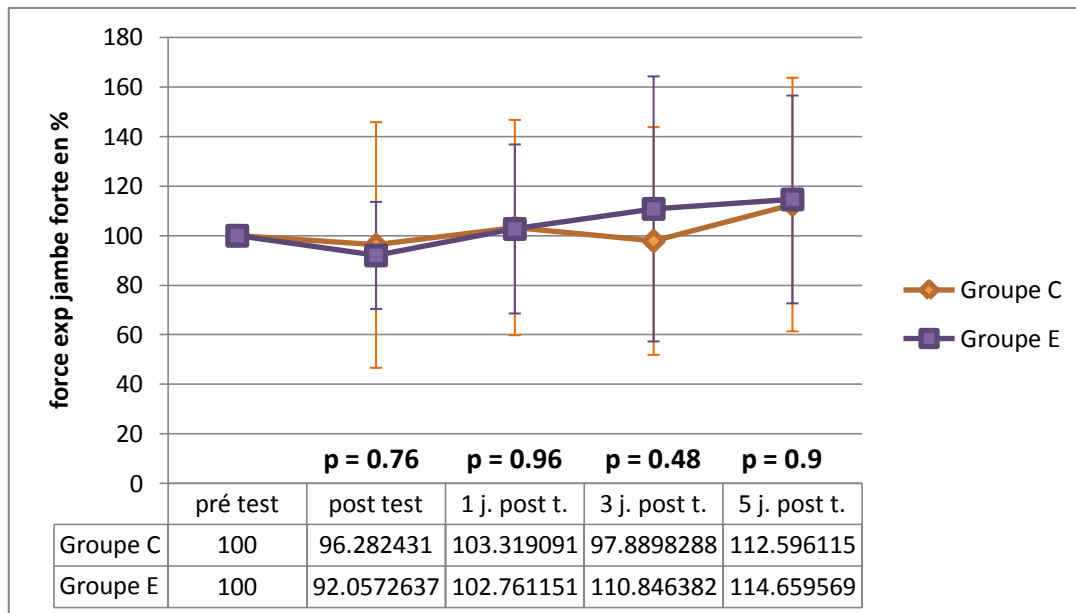


Fig. 22: représentations graphiques des résultats de la variable "force exp jambe forte" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Les deux graphes (Fig. 22 p. 48) représentant cette variable dépendante sont encore une fois révélateurs ; les valeurs moyennes des deux groupes à chaque stade du test sont, de manière générale, très proches. Cette tendance est confirmée par un indice « p » élevé de l'analyse des variances (0.68). Du début à la fin du test les deux courbes de la Fig. 22 (p. 48) se superposent, à l'exception du stade quatre, où une différence négligeable se dessine ; trois jours après l'induction des courbatures, le groupe E ( $110.84 \pm 53.4$  %) possède une force explosive moyenne légèrement plus haute que celle du groupe C ( $97.88 \pm 45.9$  %). Cet écart se traduit par un indice  $p = 0.48$  du test de Student ; l'indice le plus bas concernant cette variable.



## 4.4 Résultats de la force explosive sur la jambe faible

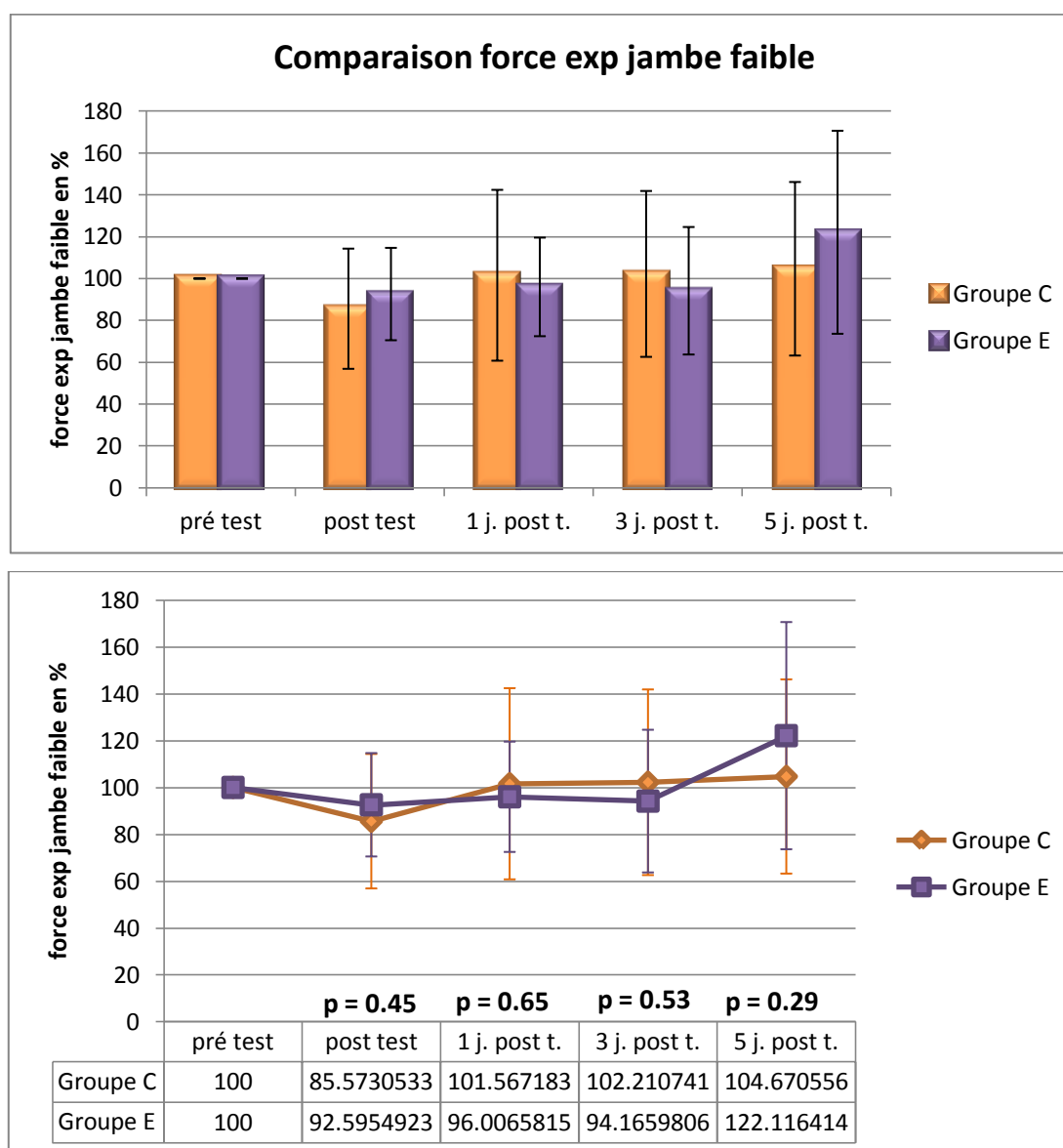


Fig. 23: représentations graphiques des résultats de la variable "force exp jambe faible" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Du côté de la jambe faible, l'indice « p » de l'analyse des variances (0.74) montre que l'évolution dans le temps de la force explosive moyenne entre les deux groupes n'est pas plus significative que pour la variable « force exp sur la jambe forte ». La trajectoire des courbes représentatives des deux groupes (Fig. 23 p. 49) ne semble cependant pas aussi identique que dans le cas de la force explosive sur la jambe forte, particulièrement en fin de test. En effet la différence la plus flagrante se trouve à la hauteur de l'ultime stade du test. L'indice « p » du test de Student (0.29) indique qu'il existe à ce stade une plus grande différence, mais qui est toutefois loin d'être

significative ; le groupe E ( $122.11 \pm 48.5 \%$ ) termine le test avec une force explosive moyenne plus élevée que le celle du group C ( $104.67 \pm 41.4 \%$ ).

#### 4.5 Résultats de la hauteur de saut des CMJ

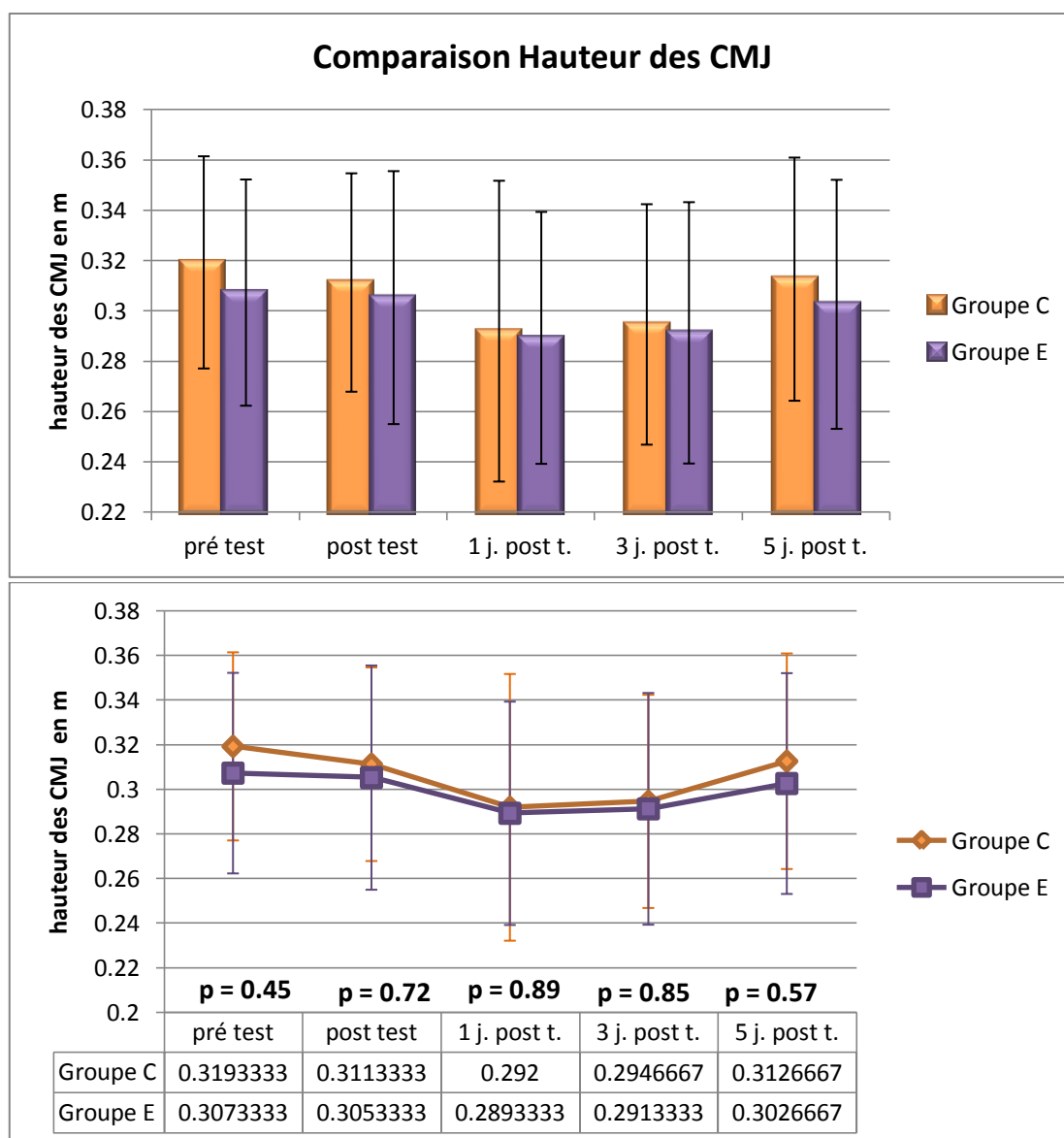


Fig. 24: représentations graphiques des résultats de la variable "hauteur des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Sur le graphe inférieur de la figure ci-dessus (Fig. 24 p. 50), les courbes du groupe C et E décrivent une trajectoire parallèle et quasiment identique. Le léger décalage entre les deux courbes provient du fait que les deux groupes n'avaient pas exactement la même hauteur moyenne de saut mesurée avant l'induction des courbatures. L'analyse des variances ( $p = 0.32$ ) indique, dans un premier temps, que de manière générale il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes

dans le temps. Dans un deuxième temps, l'analyse des valeurs moyennes des deux différents groupes à chaque stade du test confirme le résultat révélé par l'ANOVA ; les indices « p » oscillent entre des valeurs de 0.45 et 0.89. Dans ce cas, il n'existe donc pas de tendance, et encore moins de significativité statistique.

#### 4.6 Résultats de la force minimale des CMJ

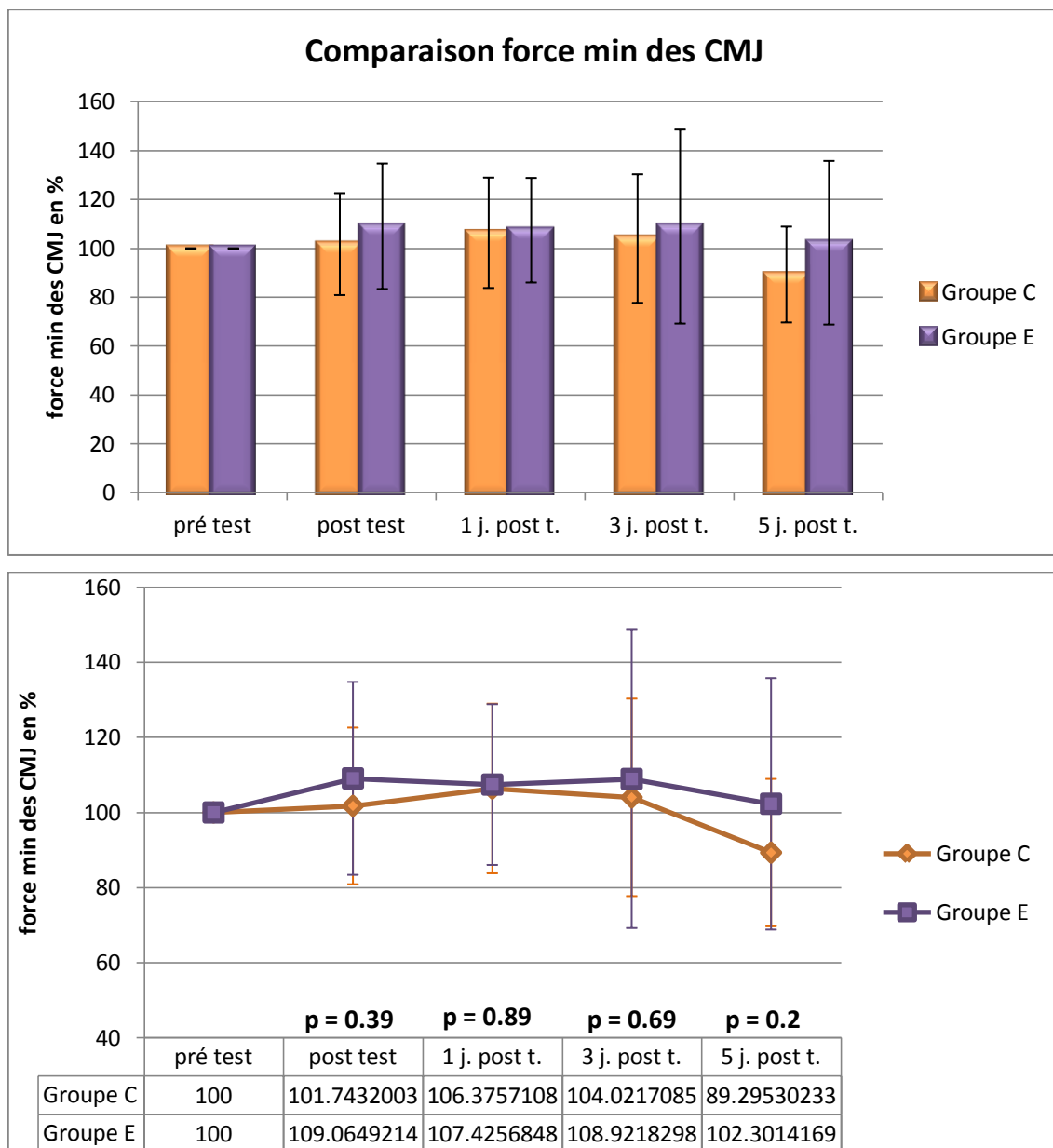


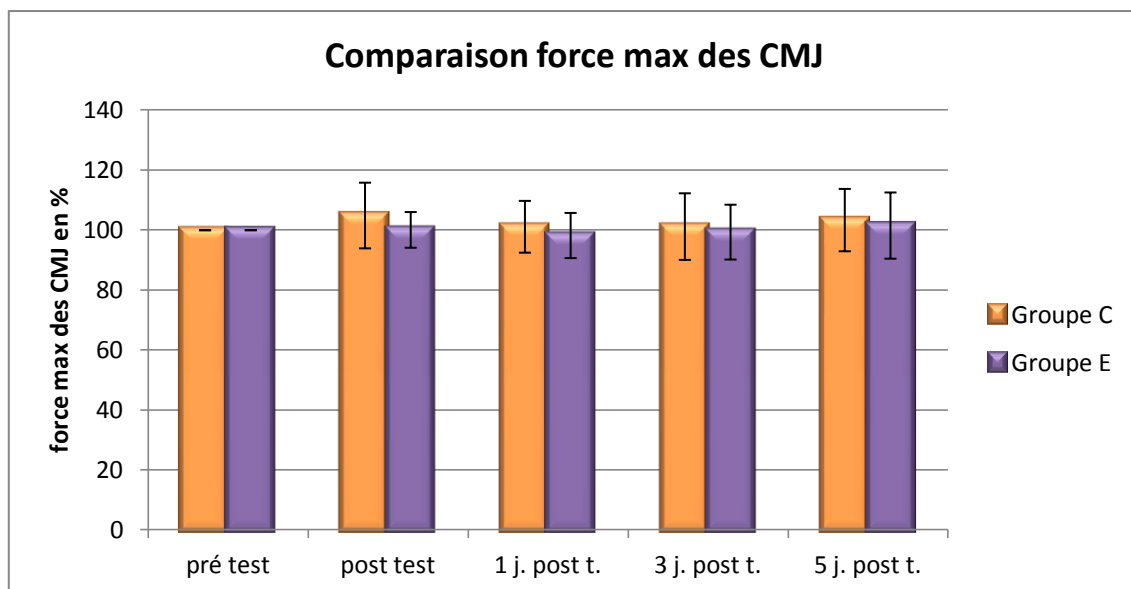
Fig. 25: représentations graphiques des résultats de la variable "force min des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Avec un indice  $p = 0.16$ , l'analyse des variances montre qu'aucune différence statistique n'est à relever entre l'évolution dans le temps de la force minimale du groupe C et celle du groupe E pour cette variable dépendante. En effet les deux

courbes représentées sur la Fig. 25 (p. 51) semblent prendre une trajectoire identique à quelques détails près. La courbe du groupe C évolue légèrement en dessous de celle du groupe E, avec une différence maximum au stade ultime du test ; l'indice « p » du test de Student (0.2) démontre qu'une différence est perceptible à ce stade du test entre les deux groupes (C =  $89.29 \pm 19.6$  % ; E =  $102.3 \pm 33.4$  %). Néanmoins une fois de plus, aucun indice ne permet de justifier une réelle significativité statistique, ni même une tendance. Dans ce cas, l'interprétation des résultats peut se faire de la manière suivante : les sujets vont plus ou moins plier les genoux selon la douleur ressentie dans les mollets. Si les valeurs sont élevées, cela signifie que les sujets ont eu une faible amplitude de flexion des genoux, et inversement.

Remarque : pour cette variable et la prochaine, l'unité de l'axe vertical des graphes est en « pourcent » de la force minimale ou maximale (N) du stade pré test, étant donné que les deux groupes n'avaient pas les mêmes forces minimales et maximales moyennes avant l'induction des courbatures sur la plateforme de force.

#### 4.7 Résultats de la force maximale des CMJ



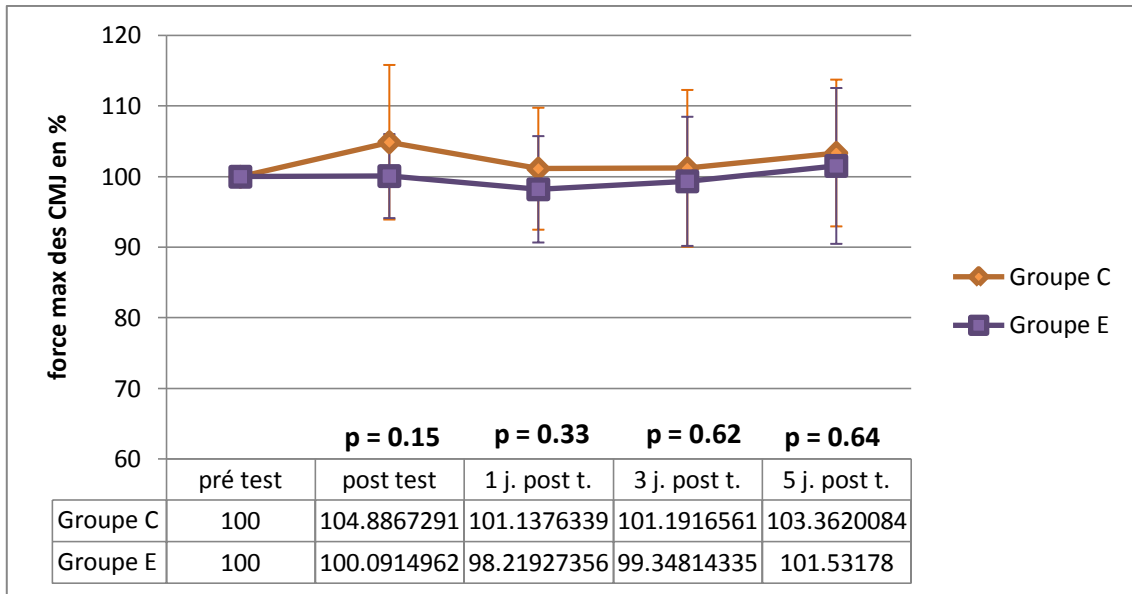


Fig. 26: représentations graphiques des résultats de la variable "force max des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Dans le cas de « la force max des CMJ », les courbes représentatives du groupe C et E (Fig. 26 p. 53) suivent une trajectoire à nouveau presque identique, à la différence près que cette fois-ci la courbe du groupe E évolue légèrement en dessous de celle du groupe C. Malgré un indice « p » très proche du seuil de significativité (0.058), l'analyse des variances indique qu'il n'existe toutefois pas de significativité statistique entre les deux groupes. L'indice « p » du test de Student le plus bas pour cette variable dépendante (0.15) concerne le stade deux du test ; quelques minutes après l'induction des courbatures, la moyenne du groupe C ( $104.88 \pm 10.9 \%$ ) est plus élevée que celle du groupe E ( $100.09 \pm 5.9 \%$ ). Néanmoins encore une fois aucune différence statistique n'est à noter dans ce cas.

## 4.8 Résultats de l'évaluation de la perception de la douleur

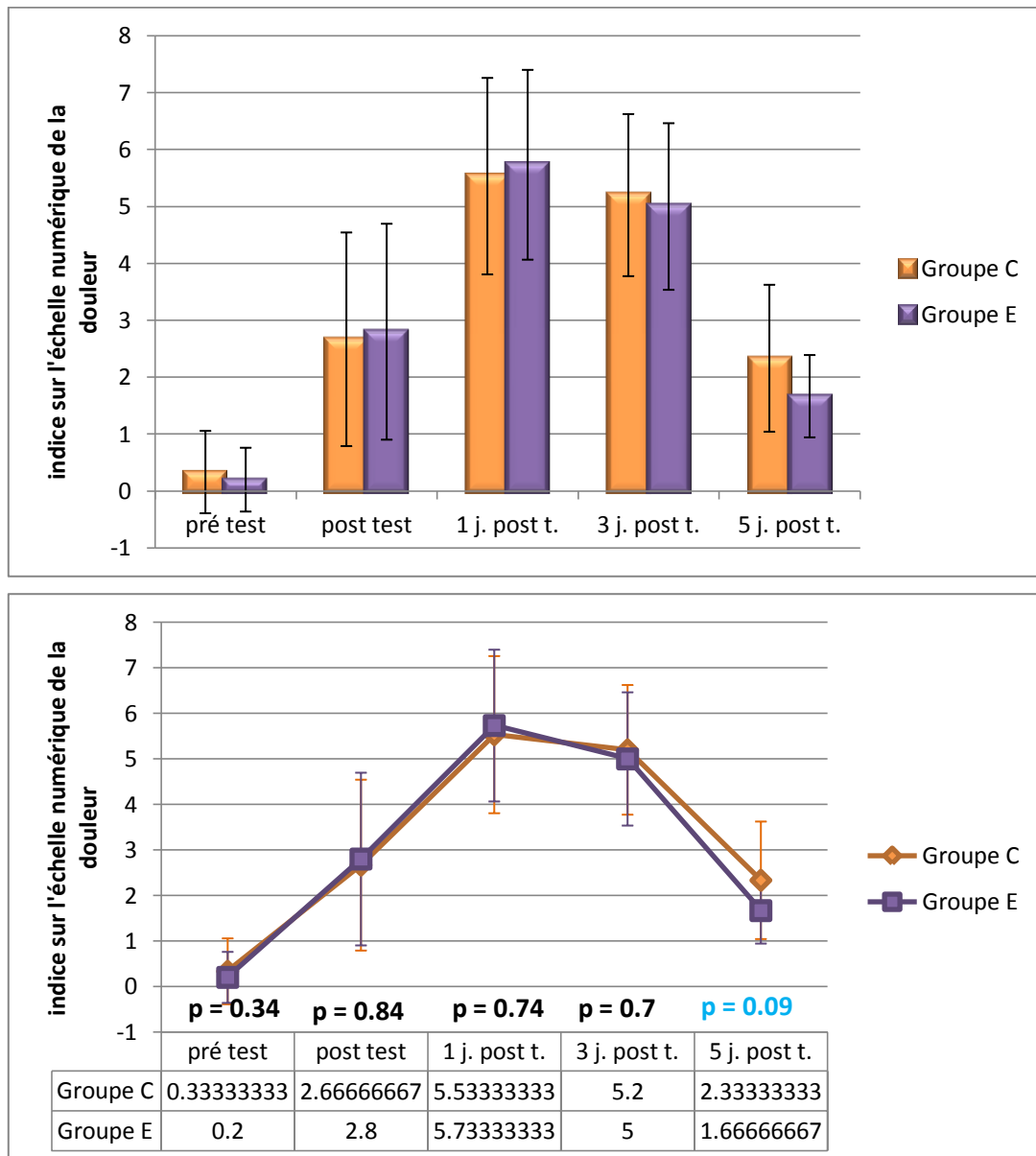


Fig. 27: représentations graphiques des résultats de la variable "perception de la douleur" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet)

Dans le cas de la perception de la douleur musculaire, l'indice « p » (0.92) de l'analyse des variances est sans équivoque ; il n'y a aucune différence significative dans le temps entre les groupes C et E. Sur la représentation ci-dessus (Fig. 27 p. 54), il est évident que les deux courbes se confondent presque sur la totalité du graphe. Seul le stade cinq du test présente un indice « p » (0.09) du test de Student synonyme de tendance ; au cinquième jour après l'induction des courbatures, le groupe E (indice sur l'échelle numérique de la douleur =  $1.66 \pm 0.72$ ) perçoit en moyenne une douleur moins prononcée que le groupe C (indice =  $2.33 \pm 1.29$ ). Cette

différence n'est toutefois pas suffisante pour qu'il y ait une réelle significativité statistique.

## 5. Discussion

Avant de donner une réponse à la première des deux questions de recherche posées en introduction de ce travail, il est nécessaire d'apporter quelques précisions. Tout d'abord, le choix de travailler avec des pourcentages, par opposition aux valeurs absolues, des valeurs de la majorité des variables utilisées dans la réalisation du test s'est imposé de lui-même. En effet les deux groupes de tests, n'ayant pas les mêmes prédispositions physiologiques et musculaires, n'étaient pas homogènes avant le test. Selon les variables étudiées, le groupe Contrôle présentait des valeurs moyennes pré test plus élevées que le groupe Expérimental (hauteur des CMJ ; C =  $0.319 \pm 0.04$  m, E =  $0.307 \pm 0.04$  m, force maximale des CMJ ; C =  $1643.2 \pm 326$  N, E =  $1601 \pm 298.8$  N), ou inversement (force maximale sur la jambe forte ; C =  $500.5 \pm 156.4$  N, E =  $557.4 \pm 175.2$  N, force maximale sur la jambe faible ; C =  $433.18 \pm 125.4$  N, E =  $488.8 \pm 129.5$  N, force explosive sur la jambe forte ; C =  $1804.4 \pm 679.4$  N/ms, E =  $1950.1 \pm 860.6$  N/ms, force explosive sur la jambe faible ; C =  $1642.5 \pm 489.1$  N/ms, E =  $1896.1 \pm 608$  N/ms, et la force minimale des CMJ ; C =  $305.1 \pm 112.1$  N, E =  $369.1 \pm 138.3$  N). Dès lors, un pourcentage par rapport à la valeur moyenne en pré test était calculé pour les moyennes de chaque stade du test (pour toutes les variables physiologiques<sup>30</sup> à l'exception de la hauteur des CMJ). Cette méthode a déjà été utilisée à plusieurs reprises, notamment dans le cadre de l'étude de Vanderthommen et al. (2007). Dans la mesure où cette méthode n'aurait pas été exploitée dans le cas présent, les résultats de l'analyse des variances ou du test de Student auraient certainement été biaisés.

Outre ce choix d'utilisation de pourcentage, il a été décidé de regrouper les valeurs des variables mesurées sur l'instrument de recherche, conçu pour étudier les forces du mollet, en forces maximale et explosive sur les jambes forte et faible, et non pas les jambes gauche et droite. Après lecture visuelle générale des graphiques représentant l'évolution de la force en fonction du temps sur cet instrument de

---

<sup>30</sup> Elles concernent toutes les variables analysées dans cette étude, à l'exception de la variable de la perception de la douleur, qui sera, elle, classée de variable « perceptive ».

mesure, force a été de constater que les sujets avaient en moyenne une force maximale et explosive plus élevées dans le mollet de leur jambe forte que de leur jambe faible<sup>31</sup>. Cette différence peut s'expliquer par le fait que, selon le sport de prédilection pratiqué par le sujet, ce dernier présente davantage de force maximale et explosive dans le mollet de sa jambe d'appel que dans celui de sa jambe d'appui. Une autre interprétation, plus proche de cette recherche, verrait davantage cette différence de force comme une conséquence de l'exercice induisant les courbatures aux sujets ; une adaptation rapide « forcée » sur le tapis de course aurait poussé les sujets à trouver rapidement une séquence de mouvements leur permettant de réaliser l'exercice demandé sans l'interrompre. Cependant il se peut que dans la majorité des cas, l'urgence du moment ait contraint les sujets à adopter une posture provoquant une modification de leur pas de course habituel en marche arrière, les obligeant à faire travailler davantage un mollet que l'autre. Un muscle du gastrocnémien plus lésé que celui de la jambe opposée se traduirait donc par une perte de force maximale et explosive plus grande dans un mollet que dans l'autre.

Tout en prenant en considération ces quelques précisions, il est temps à présent de répondre à la première question de recherche posée dans le cadre de cette étude, à savoir :

- L'électromyostimulation provoque-t-elle une accélération du processus de récupération du muscle du gastrocnémien courbaturé à la suite d'un effort intense et inhabituel.

Nous sommes en mesure de répondre négativement à cette question ; ni l'analyse des variances, ni l'utilisation du test de Student n'ont permis de trouver de résultats significatifs au niveau statistique. Concernant les variables d'ordre physiologique, aucun indice « p » égal ou inférieur à 0.05 (seuil de significativité) n'a été découvert lors des comparaisons des moyennes entre les deux groupes à chaque stade du test.

De manière générale, les graphes représentant en parallèle les courbes des deux groupes étaient nets et révélateurs ; celles-ci prenaient une trajectoire presque identique et se confondaient en certains points (Fig. 22 p. 48 et Fig. 26 p. 53). Dans

---

<sup>31</sup> Cf. annexe 11.9



le cas de la force maximale sur la jambe forte et la hauteur des CMJ (Fig. 20 p. 45 et Fig. 24 p. 50), les courbes se confondaient même sur la presque totalité du graphe.

Sans pour autant être synonyme de significativité statistique, la courbe du groupe C se trouvait même très légèrement en dessus de celle du groupe E dans la majorité des variables physiologiques suivantes : la force maximale sur la jambe forte et faible (Fig. 20 p. 45 et Fig. 21 p. 46) et la force maximale et la hauteur des CMJ (Fig. 26 p. 53 et Fig. 24 p. 50). Dans le cas de la force maximale des CMJ, les écarts types sont restreints et réguliers, et la distinction entre les deux courbes est telle que l'analyse des variances indique une tendance ( $p = 0.058$ ). Toutes ces petites distinctions auraient donc tendance à nous amener vers l'hypothèse inverse formulée dans cette recherche, à savoir que le processus de récupération du muscle courbaturé serait plus rapide sans l'utilisation de l'électromyostimulation. Cependant, de si faibles différences ne permettent en aucun cas de soutenir cette tendance.

Les différences les plus marquantes se retrouvent à de rares stades du test de quelques variables physiologiques, à savoir au stade trois du test de la force maximale sur la jambe faible ( $p = 0.13$ ), au stade cinq du test pour la variable de la force explosive sur la jambe faible ( $p = 0.29$ ), au stade cinq du test de la force minimale des CMJ ( $p = 0.2$ ) et au stade deux du test de la force maximale des CMJ ( $p = 0.15$ ). Néanmoins ces valeurs de l'indice « p » du test de Student restent considérablement isolées et ne permettent donc pas de dégager une tendance générale quelconque.

Enfin, il semble nécessaire de revenir sur un aspect déjà brièvement mentionné dans la partie des résultats. A l'image des études menées par Denegar et Perrin (1992), McLoughlin et al. (2004), Tessitore et al. (2008) ou encore Vanderthommen et al. (2007), nous nous attendions à trouver nous aussi une performance pré test référence plus élevée que les performances mesurées dans les stades suivants du test, et ceci pour toutes les variables physiologiques (à l'exception de la variable de la force minimale des CMJ). Manifestement, pour toutes les variables concernées (force maximale et explosive sur la jambe forte et faible et la force maximale des CMJ), cela n'a pas été le cas. Au contraire dans certains cas la performance pré test était même la plus faible enregistrée sur toute la durée du test (Fig. 20 p. 45 et Fig. 21 p. 46). La raison la plus plausible de ces résultats inattendus provient

certainement de ce que l'on nomme communément l'apprentissage de la tâche. Pour reprendre de manière très superficielle la théorie de l'approche cognitive (Delignières & Nourrit, 1997), l'apprentissage se déroule comme une succession d'étapes. D'abord, le sujet essaie de comprendre l'objectif de la tâche et cherche une réponse appropriée. Il réussit à exécuter la tâche, mais très souvent de manière approximative. Dans une deuxième étape associative, il procède à un affinement progressif du programme moteur, diminue ses erreurs et sa performance devient meilleure. Ces deux étapes permettraient donc d'expliquer l'amélioration rapide des performances des sujets sur les deux instruments de mesure lors des différentes étapes successives du test.

La deuxième question de recherche exposée dans ce travail est formulée ainsi :

- L'électromyostimulation permet-elle de diminuer significativement les sensations de douleur accompagnant le muscle du gastrocnémien courbaturé à moyen terme ?

Dans cette recherche une seule variable permettait de donner une réponse à cette question, à savoir la variable de la perception de la douleur. Les sujets communiquaient à l'examineur, par l'intermédiaire d'un questionnaire élaboré pour la circonstance, le niveau de douleur ressentie dans les mollets aux cinq stades du test. Comme annoncée dans la partie des résultats, une fois de plus la comparaison entre les deux courbes représentant les deux groupes (Fig. 27 p. 54) ne révèle rien de significatif, hormis une tendance qui se dégage au stade cinq du test ( $p = 0.09$ ). En effet cinq jours après l'induction des courbatures la valeur moyenne du groupe E (indice =  $1.66 \pm 0.72$ ) est moins élevée que la valeur moyenne du groupe C (indice =  $2.33 \pm 1.2$ ). Malgré cette tendance, nous sommes en droit d'apporter une réponse à nouveau négative à cette deuxième question de recherche.

En analysant les quinze valeurs qui composent la valeur moyenne de la perception de la douleur au stade cinq pour le groupe C (indice =  $2.33 \pm 1.2$ ), il a été flagrant de remarquer que deux de ces valeurs tirent de façon non négligeable cette moyenne vers le haut<sup>32</sup> ; cela signifie que chez deux sujets du groupe C, la douleur était encore vivement présente même cinq jours après l'induction des courbatures. Ce

---

<sup>32</sup> Cf. annexe 11.9

phénomène ne s'est toutefois pas passé dans le groupe E, ce qui se traduit par une valeur moyenne moins élevée au stade cinq du test (indice =  $1.66 \pm 0.72$ ). Cette observation pourrait nous amener à penser que l'application de l'électromyostimulation en récupération à des courbatures ne diminue pas de façon distincte l'intensité de la douleur, mais évite une présence prolongée anormale de la douleur, comme cela pourrait être le cas dans une récupération passive.

En outre, les résultats du questionnaire de la perception de la douleur ont pu être influencés selon le moment durant lequel les sujets répondaient à la question ; certaines études (Babault et al. 2011 ; Denegar et al. 1992 ; McLoughlin et al. 2004) rapportent qu'un effet analgésique transitoire est perceptible sur la zone de douleur suite à une séance d'électromyostimulation. Dans notre étude, certains sujets du groupe E répondaient au questionnaire seulement quelques minutes après la séance d'électromyostimulation, alors que d'autres le faisaient plusieurs heures après l'application quotidienne de courant électrique dans les muscles. Dans le deuxième cas, il est possible que l'effet analgésique de la séance d'électromyostimulation avait déjà disparu ou du moins diminué fortement à l'heure de répondre au questionnaire.

Enfin, il est utile de préciser que, selon la disponibilité des sujets en semaine de test, ce dernier a pu dans certains cas être réalisé tôt le matin. Un réveil musculaire incomplet pourrait être à l'origine d'une perception de la douleur plus importante lors de la prise de mesures aux stades suivant celui de l'induction des courbatures (le muscle n'étant généralement pas autant chaud tôt le matin qu'en fin de journée).

## 5.1 Liens avec les connaissances actuelles

Concernant le facteur physiologique (ou neuromusculaire) de notre étude, les résultats semblent clairs et révélateurs ; aucune différence significative entre le groupe C et le groupe E n'a été décelée. Ces résultats s'accordent à tous ceux qui ont déjà été trouvés dans les études menées à ce sujet. Les paramètres d'électromyostimulation utilisés dans cette recherche, décrits comme étant les plus efficaces dans ce cas de récupération selon Crépon et al. (2007), n'ont pas été à la hauteur de nos attentes.

Les résultats liés à la perception de la douleur dans les muscles courbaturés ne sont pas plus significatifs que les précédents, malgré une tendance en toute fin de test. Ils

tendent donc à contredire les conclusions des études de Denegar & Perrin (1992), McLoughlin et al. (2004) ou encore Tessitore et al. (2007), qui prêtent à l'électromyostimulation la faculté de diminuer sensiblement la perception de la douleur dans les muscles courbaturés les jours suivant le test initial. Néanmoins les résultats de cette étude s'accordent à la grosse majorité des recherches qui prétendent qu'aucun effet notable n'est perçu sur la diminution de la perception de la douleur à moyen terme (Allen et al. 1996 ; Butterfield et al. 1997 ; Craig et al. 1996 ; Martin et al. 2004, cité par Babault et al. 2011 ; Tessitore et al. 2008 ; Vanderthommen et al. 2007, 2010).

Comme il a déjà été mentionné dans la partie théorique de ce travail, les paramétrages utilisés dans les tests des différentes études sont très divers (fréquence, intensité, placement des électrodes). De plus, la méthodologie mise en place diffère très souvent d'une étude à l'autre (choix du groupe musculaire traité, type d'effort induisant les courbatures, nombre de séances d'électromyostimulation suivant l'induction des courbatures). La comparaison des résultats de cette recherche avec ceux relevés dans d'autres études reste donc délicate à réaliser et les éventuels résultats divergents doivent être perçus avec prudence.

## 5.2 Limites de la recherche

C'est pendant et juste après la réalisation de cette étude que s'est faite la découverte de quelques points susceptibles d'être améliorés dans le but de reproduire une telle recherche avec un maximum de rigueur.

Les trente individus de sexe masculin admis au test de cette recherche étaient répartis dans deux groupes totalement hétérogènes ; mis à part un âge compris entre dix-huit et trente ans et une pratique sportive régulière (deux à huit heures d'activité physique par semaine), les sujets possédaient des données anthropométriques diverses. De plus, certains d'entre eux pratiquaient des sports plus dynamiques que d'autres, dans lesquels l'exécution de sauts ou de démarrages sont fréquents. Or il est possible que ce type de sportifs, potentiellement plus nombreux dans le groupe C, présente une tendance à récupérer plus rapidement dans les formes d'exercices demandées lors des stades du test suivant l'induction des courbatures. Enfin, la bonne condition physique, le régime équilibré et un cycle veille-sommeil adapté et régulier de certains sujets peuvent avoir plus d'impact sur le processus de

récupération que les deux méthodes de récupération utilisées dans cette étude. Tous ces facteurs d'influence sont également relevés dans les études de Tessitore et al. (2007, 2008). Cependant avec les moyens et le temps mis à disposition pour cette recherche il n'a pas été aisé de trouver des sujets disponibles davantage homogènes.

Les valeurs des variables de la hauteur, de la force maximale et de la force minimale des CMJ étaient calculées par le biais de l'exécution de saut de détente (CMJ) sur la plateforme de force. En partant de la constatation, après feedback des sujets, que la zone lésée lors du test était très localisée, il est légitime de se poser la question de savoir si un tel moyen de mesure était approprié dans le cas présent. En effet plusieurs groupes musculaires sont impliqués lors cet exercice, en particulier les quadriceps. De plus, comme il a déjà été mentionné dans la partie théorique, le muscle perd au maximum quarante pourcent de sa force maximale de base lorsqu'il est touché par des courbatures. Une simple perte de quelques dizaines de pourcent de force maximale dans une zone très ciblée du muscle du gastrocnémien dans le mollet (dans le cas de cette étude) n'est donc peut-être pas suffisante pour relever une différence significative des performances dans le temps des trois variables en question.

Au niveau musculaire et à une échelle microscopique maintenant, l'objectif de la course en marche arrière sur le tapis de course incliné était d'induire des courbatures, donc de léser les sarcomères d'un certain nombre de fibres musculaires. L'effort demandé n'étant pas suffisamment intensif, il est probable que seules les fibres lentes aient été touchées par cette lésion. Or ce sont les fibres rapides qui sont les plus sollicitées lors des exercices entrepris à tous les stades du test suivant l'induction des courbatures. La méthode censée induire des courbatures se doit donc d'être plus dynamique et intensive dans le but de léser des fibres rapides et non pas des fibres lentes, à l'image de l'étude de Craig et al. (1996).

### 5.3 Points forts de la recherche

A défaut d'avoir obtenu des sujets davantage homogènes pour réaliser les tests de cette étude, le temps à disposition a permis de trouver un nombre conséquent d'individus disponibles et motivés (avec une moyenne de huit sur dix sur l'échelle de la motivation). Les deux groupes de quinze sujets chacun forment donc un

échantillon de taille suffisamment élevée pour que les résultats de l'étude soient considérés comme étant significatifs au niveau statistique. En outre, aucun sujet n'a été écarté de l'étude ; tous présentaient les conditions de base nécessaires pour participer au test.

Du point de vue du matériel utilisé afin de mesurer les différentes variables dépendantes, la faculté des sciences du sport et de la motricité de l'Université de Fribourg dispose de deux instruments de recherche de hautes technologies (l'outil conçu pour mesurer différentes forces dans le mollet et la plateforme de force). L'exploitation d'un tel matériel a permis de produire des données précises, accompagnées d'une marge d'erreur négligeable. Le traitement et l'analyse des résultats se reposent donc sur une base de données fiable.

## 5.4 Propositions d'axes de recherches pour des études futures

- 1) La première proposition serait de réunir non pas deux groupes formés de sujets distincts, mais de former un seul groupe de sujets qui participent deux fois au test ; une première fois en procédant à une récupération par l'électromyostimulation et une seconde fois en suivant une récupération passive. Ce procédé a déjà été utilisé dans les études de McLoughlin et al. (2004) et Vanderthommen et al. (2007). Dans l'optique d'éviter le « repeated-bout effect », il est néanmoins indispensable d'observer une période de pause suffisamment longue entre les deux tests ; selon Tiidus (2008), cette période devrait durer trois à six semaines minimum. Ce procédé permettrait de comparer des résultats plus fiables, particulièrement pour la variable de la perception de la douleur, qui contiendrait des valeurs moins subjectives.
- 2) La deuxième proposition consisterait à introduire un autre moyen de mesurer l'évolution des courbatures ; celui de mesurer le taux de créatine kinase dans le sang. Ce moyen est certes plus coûteux, mais c'est celui qui a révélé les résultats les plus prometteurs dans certaines études, dont celles de Beaven et al. (2013) et Vanderthommen et al. (2007). Un intérêt particulier de ce moyen de mesure est qu'il est davantage corrélé à l'état de la lésion musculaire plutôt qu'au niveau d'intensité de la douleur due à la réponse inflammatoire qui accompagne la lésion.

3) Il a déjà été relevé que dans de nombreuses études, les paramètres de la séance d'électrostimulation étaient la plupart du temps trop hétérogènes, particulièrement concernant l'intensité du courant électrique appliqué (DeSantana et al. 2008). Cette diversité de paramétrage peut en partie être la cause de sociétés comme celle de Compex, qui proposent des appareils électro stimulateurs munis de programmes de récupération prédéfinis, dans lesquels le niveau d'intensité du courant est totalement géré par l'utilisateur de l'appareil. Dans le cas de cette recherche, c'est justement un de ces programmes qui a été utilisé par les sujets. En outre, la consigne donnée était d'appliquer une intensité de courant dans la limite de tolérance à la douleur. L'analyse des feedbacks oraux des sujets du groupe E a permis de relever une certaine disparité entre les niveaux d'intensités des courants appliqués. En effet alors que certains sujets ne montaient pas plus haut que le niveau d'intensité correspondant à cinquante sur l'appareil Compex, d'autres atteignaient des intensités de cent huitante. Or selon DeSantana et al. (2008), le niveau d'intensité appliqué devrait à tout prix être le plus élevé possible afin d'obtenir des résultats concluants. La dernière proposition serait donc de fixer une intensité commune ou un intervalle d'intensités dans lequel il existe une intensité minimum et maximum à ne pas transgresser. Au contraire, il existe aussi la possibilité de réaliser des tests comprenant un groupe récupérant de manière active grâce à l'application d'un courant électrique de basse, voire très basse intensité, et un groupe récupérant activement à l'aide d'un courant de très haute intensité.

## 6. Conclusion

Cette étude touchant à sa fin, il est temps de faire un bref retour sur les différents objectifs énoncés en début de travail et d'effectuer une synthèse rapide des résultats trouvés. Notre hypothèse générale voulait que l'application d'un programme de récupération par électromyostimulation à plusieurs reprises après un effort intense et inhabituel sur un muscle courbaturé provoque une régénération accélérée à moyen terme.

Nous sommes à présent en mesure de réfuter cette hypothèse. D'un point de vue physiologique et d'un point de vue perceptif, les variables dépendantes utilisées dans le test pour vérifier cette hypothèse ne nous ont montré aucun résultat significatif au niveau statistique. Certes, quelques tendances ont été relevées çà et là, néanmoins elles restent isolées et ne constituent en aucun cas des valeurs marquantes à prendre en compte. Concernant les résultats d'ordre physiologique, cette étude rejoint celles qui ont déjà été réalisées sur ce sujet (Butterfield et al. 1997 ; Denegar & Perrin. 1992 ; Lattier et al. 2004 ; Martin et al. 2004 ; McLoughlin et al. 2004 ; Tessitore et al. 2007, 2008 ; Vanderthommen et al. 2007, 2010). Quant aux résultats d'ordre perceptif, cette recherche confirme les conclusions d'études comme celles d'Allen et al. (1999), de Craig et al. (1996), Tessitore et al. (2008), Vanderthommen et al. (2007, 2010), à savoir que l'intensité de la douleur ressentie dans le muscle lésé ne diminue pas de manière significative grâce à l'application de l'électromyostimulation. Au contraire, nos résultats contredisent quelques études (Denegar & Perrin, 1992 ; McLoughlin et al. 2004 ; Tessitore et al. 2007) qui approuvent un certain effet bénéfique de l'électromyostimulation sur la douleur.

Au final cette méthode de récupération n'a donc pas montré de véritables valeurs scientifiques, mais peut apparaître comme étant un moyen de récupération valide lorsque la douleur est le facteur limitant le plus important. Au vu des résultats non concluants de cette étude, Il est capital de prendre en compte les limites de la recherche et les propositions d'axe de recherches dans le but de développer et poursuivre de nouvelles études sur ce sujet.



## 7. Bibliographie

### Ouvrages généraux

Millet, G. & Perrey, S. (2005). *Physiologie de l'exercice musculaire*. Paris : Ellipses.

Monod, H., Flandrois, R. & Vandewalle, H. (2007). *Physiologie du sport : bases physiologiques des activités physiques et sportives*. (6<sup>e</sup> éd.) Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson.

Nguyen, S., Bourouina, R. & Allin-Pfister A.-C. (2010). *Manuel d'anatomie et de physiologie*. (5<sup>e</sup> éd.) Rueil-Malmaison : Lamarre.

Komi, P.V. (2011). *Neuromuscular aspects of sport performance*. Oxford : Wiley-Blackwell.

Tiidus, P.M. (2008). *Skeletal Muscle Damage and Repair*. Leeds : Human Kinetics.

Weineck, J. (1997). *Manuel d'entraînement*. (4<sup>e</sup> éd.) Paris : Vigot.

Wilmore, J.H., Costill, D.L. & Kenney, W.L. (2009). *Physiologie du sport et de l'exercice*. (4<sup>e</sup> éd.) Bruxelles : De Boeck.

### Articles scientifiques

Allen, J.D. & Mattacola, C.G. & Perrin, D.H. (1999). Effect of microcurrent stimulation on delayed-onset muscle soreness : a double-blind comparison. *Journal of Athletic Training*, 34 (4), 334-337.

Babault, N. & Cometti, C. & Maffiuletti, N.A. & Deley, G. (2011). Does electrical stimulation enhance post-exercice performance recovery ?. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2501-2507.

Barnett, A. (2006). Using recovery modalities between training sessions in elite athletes, does it help ?. *Sports Med*, 36, 781-796.

Beaven, C.M. & Cook, C. & Gray, D. & Downes, P. & Murphy, I. & Drawer, S. & Ingram, J.R. & Kilduff, L.P. & Gill, N. (2013). Electrostimulation's enhancement of recovery during a rugby preseason. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8 (1), 92-98.

- Bennett, M.H. & Best, T.M. & Babul-Wellar, S. & Taunton, J.E. (2010). Hyperbaric oxygen therapy for delayed onset muscle soreness and closed soft tissue injury. *The Cochrane Library*, 6.
- Butterfield, D.L. & Draper, D.O. & Ricard, M.D. & Myrer, J.W. & Durrant, E. & Schulthies, S.S. (1997). The effects of high-volt pulsed current electrical stimulation on delayed-onset muscle soreness. *Journal of Athletic Training*, 32 (1), 15-20.
- Byrnes, W.C. & Clarkson, P.M. & White, J.S. & Hsieh, S.S. & Frykman, P.M. & Maughan, R.J. (1985). Delayed onset muscle soreness following repeated bouts of downhill running. *Journal of Applied Physiology*, 59 (3), 710-715.
- Carcano, Y. & Isebrand, B. & Wieczorek, G. & Boudjemaa, B. (2010). Le ressenti de sportifs lors d'un massage de récupération en termes de douleur et fatigue musculaires et bien-être. *Kinésithérapie la revue*, 104-105, 46-50.
- Connolly, D.AJ. & Sayers, S.P. & McHugh, M.P. (2003). Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17, 197-208.
- Coudreuse, J.M. & Dupont, P. & Nicol, C. (2004). Douleurs musculaires posteffort. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 47, 290-298.
- Craig, J.A. & Cunningham, M.B. & Walsh, D.M. & Baxter, G.D. & Allen, J.M. (1996). Lack of effect of transcutaneous electrical nerve stimulation upon experimentally induced delayed onset muscle soreness in humans. *Pain*, 67, 285-289.
- Crépon, F. & Doubrère, J.-F. & Vanderthommen, M. & Castel-Kremer, E. & Cadet, G. (2007). Electrothérapie. Electrostimulation. *EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Kinésithérapie-médecine physique-réadaptation*, 26-145-A-10.
- Decherchi, P. & Dousset, E. & Marqueste, T. & Berthelin, F. & Hug, F. & Jammes, Y. & Grélot, L. (2003). Electromyostimulation et récupération fonctionnelle d'un muscle dénervé. *Science et Sports*, 18, 253-263.
- Dehail, P. & Duclos, C. & Barat, M. (2008). Electrostimulation et gain de force musculaire. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 51, 441-451.

- Delignières, D. & Nourrit, D. (1997). Neuere Entwicklungen und aktuelle Perspektiven der Forschung zum Motorischen Lernen in Frankreich. *Sportwissenschaft in Deutschland und Frankreich*, 143-146.
- Denegar, C.R. & Perrin, D.H. (1992). Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation, cold, and a combination treatment on pain, decreased range of motion, and strength loss associated with delayed onset muscle soreness. *Journal of Athletic training*, 27 (3), 200-206.
- DeSantana, J.M. & Walsh, D.M. & Vance, C. & Rakel, B.A. & Sluka, K.A. (2008). Effectiveness of transcutaneous electrical nerve stimulation for treatment of hyperalgesia and pain. *Curr Rheumatol Rep.*, 10 (6), 492-499.
- Dolhem, R. (2008). Histoire de l'électrostimulation en médecine et en rééducation. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 51, 427-431.
- Feiereisen, P. & Duchateau, J. & Hainaut, K. (1997). Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Experimental Brain Research*, 114, 117-123.
- Gondin, J. & Cozzone, P.J. & Bendahan, D. (2011). Is high-frequency neuromuscular electrical stimulation a suitable tool for muscle performance improvement in both healthy and humans and athletes ? *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2473-2487.
- Gregory, C.M. & Bickel, S.C. (2005). Recruitment patterns in human muscle during electrical stimulation. *Journal of the American Physical Therapy association*, 85, 358-364.
- Herbert, R.D. & De Noronha, M. & Kamper, S.J. (2011). Stretching to prevent or reduce muscle soreness after exercise. *The Cochrane Library*, 7.
- Herbert, R.D. & Gabriel, M. (2002). Effects of stretching before and after exercising on muscle soreness and risk of injury : systematic review. *BMJ* , 325-468.
- Heyman, E. & De Geus, B. & Mertens, I. & Meeusen, R. (2009). Effects of four recovery methods on repeated maximal rock climbing performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41 (6), 1303-1310.

- Lattier, G. & Millet, G.Y. & Martin, A. & Martin, V. (2004). Fatigue and recovery after high-intensity exercise Part II: recovery interventions. *Journal of Sports Medicine*, 25, 509-515.
- Law, RY. & Herbert, RD. (2007). Warm-up reduces delayed onset muscle soreness but cool-down does not: a randomised controlled trial. *Australian Journal of Physiotherapy*, 53 (2), 91-95.
- Maffiuletti, N.A. (2006). The use of electrostimulation exercise in competitive sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1, 406-407.
- Maffiuletti, N.A. (2010). Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation. *European Journal of Applied Physiology*, 110, 223-234.
- McLoughlin, T.J. & Snyder, A.R. & Brolinson, P.G. & Pizza F.X. (2004). Sensory level electrical muscle stimulation : effect on markers of muscle injury. *Br J Sports Med*, 38, 725-729.
- Paillard, T. & Noé, F. & Edeline, O. (2005). Effets neuromusculaires de l'électrostimulation transcutanée surimposée et combinée à l'activité volontaire : une revue. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 48, 126-137.
- Rushton, D.R. (2002). Electrical stimulation in the treatment of pain. *Disability and rehabilitation*, 24 (8), 407-415.
- Sesboüé, B. & Guincestre, J.Y. (2006). La fatigue musculaire. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 49, 257-264.
- Tessitore, A. & Meeusen, R. & Cortis, C. & Capranica, L. (2007) Effects of different recovery interventions on anaerobic performances following preseason soccer training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21 (3), 745-750.
- Tessitore, A. & Meeusen, R. & Pagano, R. & Benvenuti, C. & Tiberi, M. & Capranica, L. (2008). Effectiveness of active versus passive recovery strategies after futsal games. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 1402-1412.
- Thépaut-Mathieu, C. (1998). Electrostimulation et recrutement différentiel des unités motrices. *Annales de Kinésithérapie*, 25, 115-118.

Tubez, F. & Jidovsteff, B. & Wang, F.C. & Vanderthommen, M. (2010). Analyse comparative de différentes modalités d'électrostimulation du quadriceps fémoral. *Kinésithérapie la revue*, 107, 36-40.

Vanderthommen, M. & Crielaard, J.M. (2001). Eletromyostimulation en médecine du sport. *Rev Med Liège*, 56 (5), 391-395.

Vanderthommen, M. & Makrof, S. & Demoulin, C. (2010). Comparison of active and electrostimulated recovery strategies after fatiguing exercise. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, 164-169.

Vanderthommen, M. & Soltani, K. & Maquet, D. & Crielaard, J.M. & Croisier, J.L. (2007). Does neuromuscular electrical stimulation influence muscle recovery after maximal isokinetic exercise ?. *Isokinetics and exercise science*, 15, 143-149.

Ziltener, J.L. & Chantraine, A. (1997). Méthodologie de la stimulation électrique fonctionnelle. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 40, 43-48.

## Document électronique

Compex « Performance » - Manuel d'utilisation. Consulté le 25 février 2013. Disponible sur : <http://www.electrostimulateur.fr/telecharger-manuels-electrostimulateurs/tous-les-manuels.html>

# 8. Tables des illustrations

## Figures

Fig. 1: composition structurelle du muscle .....	9
Disponible sur : <a href="http://www.premiumwanadoo.com/ivanborcard/physiologie.htm">http://www.premiumwanadoo.com/ivanborcard/physiologie.htm</a>	
Fig. 2: représentation d'une unité motrice .....	11
Disponible sur : <a href="http://www.premiumwanadoo.com/ivanborcard/physiologie.htm">http://www.premiumwanadoo.com/ivanborcard/physiologie.htm</a>	
Fig. 3: résumé du processus de courbatures selon Connolly et al. (2003. p. 198) .....	16
Fig. 4: parallèle de l'évolution dans le temps entre le niveau de performance et le niveau de courbatures ressenti (Komi, 2001. p. 193) .....	17
Fig. 5: évolution dans le temps des niveaux des markers des différents symptômes après un exercice causant des dommages musculaires (Soreness :douleur, Strength :force, ROM :amplitude articulaire, Swelling :gonflement, CK :créatine kinaze, MRI/US : images magnétiques) (Tiidus, 2008. p.66).....	18
Fig. 6: influx nerveux lors d'une contraction émise par un courant électrique.....	21

Fig. 7: représentation graphique d'un courant électrique bidirectionnel avec l'amplitude, la durée de la phase et du choc, et la fréquence (i.i) (Decherchi et al.2003. p. 255).....	23
Fig. 8: graphe représentant la relation intensité-durée du stimulus électrique.....	24
Fig. 9: recrutement spatial des fibres selon l'intensité du courant (Crépon et al. 2007. p. 7) .	25
Fig. 10: aperçu schématique des différents types de courants appliqués et leurs effets connus (flèches pleines) et attendus (flèches traitillées) (Babault et al. 2011. p. 2503).....	28
Fig. 11: représentation du muscle du soléaire et des 2 chefs du muscle gastrocnémien .....	35
Disponible sur : <a href="http://www.medecin.skyrock.com">www.medecin.skyrock.com</a>	
Fig. 12: position à adopter sur l'instrument .....	35
Fig.13: graphe représentant l'évolution de la force en fonction du temps (trait noir) calculée lors d'une exécution de la tâche demandée sur l'instrument de recherche conçu pour mesurer la force du mollet d'un individu. En rouge, les deux variables mesurées sur cet instrument : la force explosive (qui correspond au degré d'inclinaison de la pente) et la force maximale émises par le mollet du sujet. ....	36
Fig. 14: déroulement d'un saut de détente (CMJ).....	37
Fig.15: graphe représentant l'évolution de la force en fonction du temps (trait noir) lors de l'exécution d'un saut de type CMJ sur la plateforme de force. En rouge, les trois variables mesurées sur cet instrument : la force minimale, la force maximale et la hauteur de saut (calculée à partir du temps de vol en milliseconde).....	38
Fig. 16: aperçu du dispositif en situation de test.....	39
Fig. 17: zone du mollet la plus touchée par les courbatures .....	39
Fig. 18: modèles des appareils prêtés par la firme Compex .....	41
Fig. 19: aperçu de la position des électrodes sur les mollets .....	42
Fig. 20: représentations graphiques des résultats de la variable "force max jambe forte" pour le groupes C (orange) et le groupe E (violet).....	45
Fig. 21: représentations graphiques des résultats de la variable "force max jambe faible" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	46
Fig. 22: représentations graphiques des résultats de la variable "force exp jambe forte" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	48
Fig. 23: représentations graphiques des résultats de la variable "force exp jambe faible" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	49
Fig. 24: représentations graphiques des résultats de la variable "hauteur des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	50
Fig. 25: représentations graphiques des résultats de la variable "force min des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	51
Fig. 26: représentations graphiques des résultats de la variable "force max des CMJ" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	53
Fig. 27: représentations graphiques des résultats de la variable "perception de la douleur" pour le groupe C (orange) et le groupe E (violet).....	54

## Tableau

<i>Tab. 1: présentation du protocole en détail.....</i>	<i>32</i>
---	-----------

## 9. Déclaration personnelle

« Je soussigné certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis mutandis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel. »

Fribourg, le 9 septembre 2013

## 10. Droits d'auteur

« Je soussigné reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur – y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles – à l'Université de Fribourg.

La cession à tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord du soussigné uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière. »

Fribourg, le 9 septembre 2013



## 11. Annexes

### Table des annexes

Annexe 1 : Liste de contrôle des conditions de base

Annexe 2 : Protocole

Annexe 3 : Journal de bord à remettre pour les participants du groupe E

Annexe 4 : Conditions importantes

Annexe 5 : Rappel d'utilisation de l'appareil électro stimulateur

Annexe 6 : Evaluation de la perception de la douleur

Annexe 7 : Lettre de décharge

Annexe 8 : Consentement des sujets

Annexe 9 : Table des données pour chacune des huit variables analysées

# Annexe 1 :

## Liste de contrôle: Préparation



Qualitätssicherung SOV 2000 SWISS OLYMPIC MEDICAL CENTERS

Nom: \_\_\_\_\_ Prénom: \_\_\_\_\_ Date de naissance: \_\_\_\_\_  
 Poids: \_\_\_\_\_ Taille: \_\_\_\_\_ Swiss Olympic Card:  Pas de carte  
 Date et heure du test: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ h Sélection:  Aucune sélection

1. **Phase d'entraînement**  Préparation  Pré-compétition  Compétition  Rééducation
2. **Dernière compétition** Date: \_\_\_\_\_ Manifestation: \_\_\_\_\_
3. **Meilleure performance** (saison passé; résultat/ rang) \_\_\_\_\_
4. **Entraînement** Nombre d'heures/sem: \_\_\_\_\_ (moyenne annuelle)
 

Type d'entraîn.	Durée totale				Intensité		
	<60'	60-120'	>120'	>300'	basse	moyenne	haute
Aujourd'hui:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hier:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Avant-hier:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. **Alimentation** Normale   
 Régime hyperglucidique  Régime amaigrissant   
 Régime dissocié  Régime riche en graisses (début < 4 jours)   
 Dernier repas: Quand ? \_\_\_\_\_ Composition: \_\_\_\_\_  
 Caféine (dern. 12 h)  non  oui quantité/quoi : \_\_\_\_\_  
 Alcool (veille au soir)  non  oui quantité/quoi : \_\_\_\_\_
5. **Maladies** (au cours des 14 derniers jours)  aucune  : \_\_\_\_\_
6. **Accidents et blessures** (depuis le dernier test)  aucune  : \_\_\_\_\_
7. **Douleurs/gêne le jour du test**  aucune  : \_\_\_\_\_
8. **Médicaments pris régul.** \_\_\_\_\_ dernière prise: \_\_\_\_\_
9. **Suppléments** (p. ex. créatine): dernière prise: \_\_\_\_\_
10. **Humeur** Cocher (je me sens d'humeur: 1=massacrante, 10=excellente): 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11. **Motivation** Cocher (je suis motivé(e) pour le test: 1=pas du tout, 10=maximum) 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
12. **Côte dominant**  gauche  droite  ambidextre  
 Définir (p ex. jambe d'appel): \_\_\_\_\_
13. **Autres interférences possibles**  
 (sommeil, voyage, etc.) \_\_\_\_\_

Courbatures dans les 2 dernières semaines avant le test:

Non  Oui, quel(s) muscle(s): \_\_\_\_\_

53

## Annexe 2 :

Méthodologie		
Planification	Explications/informations	date
Les sujets n'ont pas effectué d'activité physique intense durant les 24h avant le début du test. Ils n'ont également eu aucune courbature au mollet dans les 2 semaines précédant le test. Lieu : salle de tests du fitness de Pérolles II et laboratoire		
1 ère étape	9) Accueil des sujets, transmission d'informations utiles, Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire)	Date à convenir
	10) Mesure des différentes forces sur les mollets	
	11) échauffement protocolé de 4' sur tapis de course	
	12) 10' de course à pied en marche arrière sur tapis de course incliné de 14%, à une vitesse de 8 km/h	
	13) 10' de repos et évaluation perceptive de la douleur (questionnaire)	
	14) Mesure des forces sur les mollets	
	15) Explications de la méthodologie à adopter pour les deux groupes (E et C)	
	16) Début de la phase de récupération pour les deux groupes (1 <sup>ère</sup> séance d'EMS le soir même)	
2ème étape	3) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C	1 jour après le test physique (24h)
	4) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	
3ème étape	3) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C.	3 jours après le test physique (72h)
	4) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	
4ème étape	5) Evaluation perceptive de la douleur (questionnaire) pour les groupes E et C.	5 jours après le test physique (120h)
	6) Mesure des forces sur les mollets pour les groupes E et C.	

## Annexe 3 :

Prénom et nom du participant : ..... Date du test : .....

Jours suivant le test →	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5
Date →					
Heure de la séance d'EMS → (électromyostimulation)					
Heure de rendez-vous au fitness →		Pas de rendez-vous ce jour-ci		Pas de rendez-vous ce jour-ci	

Nom de l'appareil électrostimulateur Compex : .....

## Annexe 4 :

1. Prière de ne pas avoir recours à toute autre forme de moyen de récupération que celui qui vous a été administré durant toute la phase de récupération.
2. Essayer d'effectuer la séance d'EMS à la même heure chaque jour dans la mesure du possible.
3. Effectuer la séance d'EMS **avant** le rendez-vous au fitness avec le testeur.

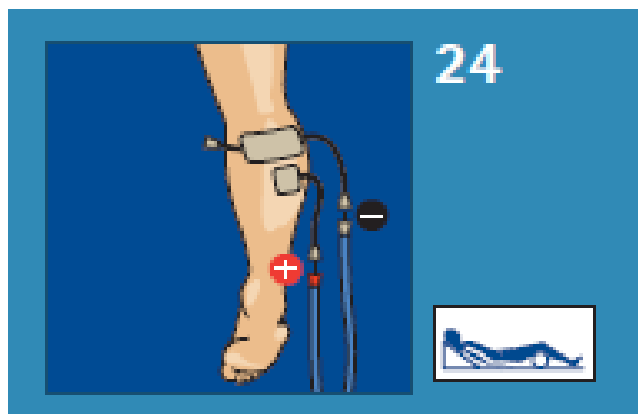
## Annexe 5 :

En enclenchant l'appareil, plusieurs programmes sont à disposition. A l'aide des touches +/-, choisir le programme nommé « sport » puis « récupération active » ou directement « récupération active », et cliquer sur la touche + (à droite) pour le sélectionner. Il s'agit ensuite de sélectionner la partie du corps que l'on veut traiter (ici les mollets). Enfin taper « Start ».

Il faut dès le début augmenter progressivement les intensités de stimulation, grâce aux touches +/- correspondantes, jusqu'à obtenir des secousses musculaires bien prononcées. Pendant la séance, il est possible que l'appareil vous demande d'augmenter le niveau des intensités (« bips » et le symbole « + » clignote). Si vous ne supportez pas de monter les intensités, il suffit d'ignorer ce message. A la fin de la séance, un petit drapeau s'illustre. Presser sur la touche « Stop ».

Placement des électrodes : Placer une petite électrode (connexion rouge) sur le point le plus douloureux du muscle à la palpation et une grande électrode (connexion transparente) à l'extrémité du muscle, comme indiqué sur l'image ci-dessous. Raser les surfaces de peau si les poils empêchent une bonne transmission du courant. Placer son corps de manière confortable (assis, couché), **mais toujours dans la même position, et pas debout.**

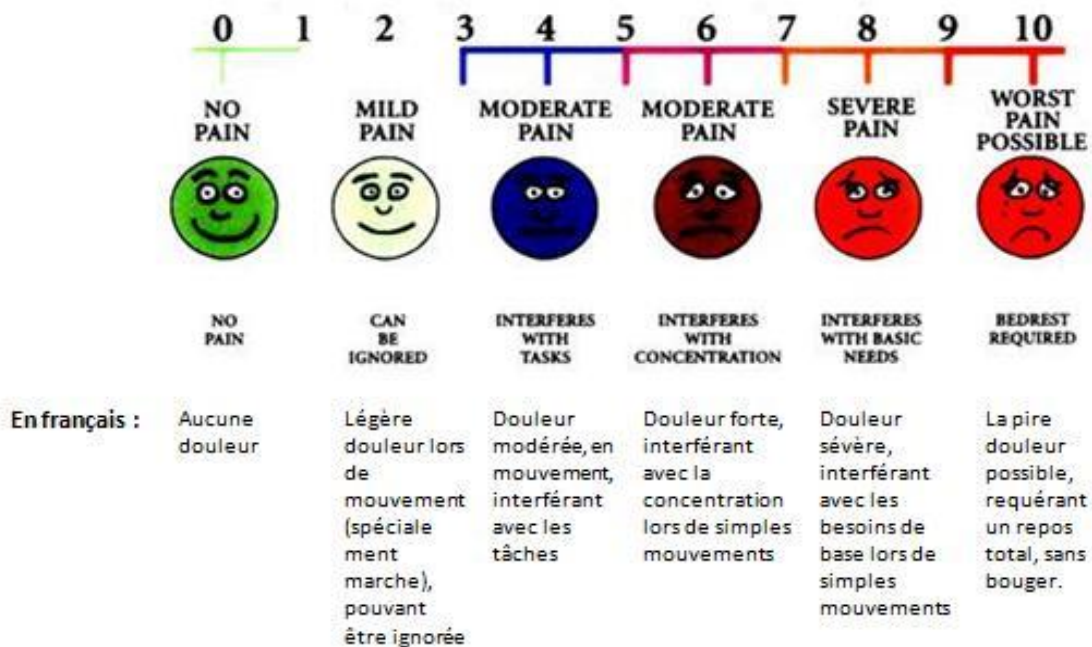
Pour plus d'informations : <http://www.electrostimulateurs-manuels.fr/fichiers/manuels/Compex/Theta-Stim/compex-theta-stim-manuel.pdf>



## Annexe 6 :

Nom et prénom du participant : .....

1) Quel est le niveau de douleur ressentie dans les mollets, avant le test (crayon brun), après le test (crayon violet), 1 jour après le test (crayon bleu), 3 jours après le test (crayon vert) et 5 jours après le test (crayon jaune) ? Remplissez le questionnaire en entourant simplement le chiffre de l'échelle numérique approprié.



## Annexe 7 :

Je soussigné Monsieur (Madame),..... déclare par la présente :

Je reconnais avoir recours à l'utilisation d'un appareil électrostimulateur de la gamme « ..... » appartenant à la marque COMPEX dans le cadre de l'étude susmentionnée. Je m'engage à emprunter ce matériel et le restituer au fournisseur en fin de test dans l'état dans lequel il m'a été confié en début de test.

Fait à Fribourg, le .....

Lu et approuvé : .....

## Annexe 8 :

Unité de Sport - Université de Fribourg

Consentement pour l'étude sur les courbatures et l'électromyostimulation effectuée par Baptiste Jaquet dans le cadre de son travail de Master.

### **Je, soussigné, certifie :**

- avoir compris et accepté les informations données
- avoir pu poser toutes les questions souhaitées et avoir reçu des réponses satisfaisantes.
- être informé que toutes les données personnelles et les résultats obtenus à mon sujet, ainsi que ma participation à l'étude sont confidentiels et ne seront disponibles qu'aux chercheurs directement impliqués dans cette étude.
- être informé que les résultats obtenus lors de l'étude seront publiés de manière anonyme, et sous une forme qui ne peut pas m'identifier, dans une ou plusieurs publications scientifiques. J'y ai donné mon accord.
- consentir à participer volontairement à l'étude susmentionnée comme sujet.

### **Sujet de l'étude**

Nom:

Prénom:

Signature:

### **Personne ayant conduit l'entretien de consentement**

Je confirme avoir personnellement expliqué au sujet désigné ci-dessus la nature, le but, la durée et les effets et risques prévisibles de l'étude

Nom:

Prénom:

Signature:

# Annexe 9 :

	Douleur (indice sur l'échelle numérique)					Hauteur des CMJ (m)					Fexp - jambe forte (N/msec)					en % de la force exp en pré test				
	pré test	post test	1.j. post t.	3.j. post t.	5.j. post t.	pré test	post test	1.j. post t.	3.j. post t.	5.j. post t.	pré test	post test	1.j. post t.	3.j. post t.	5.j. post t.	pré test	post test	1.j. post t.	3.j. post t.	5.j. post t.
<b>Groupe C</b>																				
sujet 1	0	2	8	6	3	0.27	0.3	0.25	0.25	0.25	1340.32	982.42	2145.1	953.44	1511.95	100	73.2974215	160.04387	71.1352513	112.805151
sujet 2	0	3	6	4	2	0.3	0.32	0.31	0.31	0.34	921.71	1958.4	1550.76	1883.95	2025.6	100	212.47464	168.248147	204.397262	219.765436
sujet 3	0	0	4	4	1	0.32	0.32	0.31	0.32	0.34	969.31	1520.85	1418.73	1083.67	1876.33	100	156.900269	146.36494	111.798083	193.573779
sujet 4	0	6	8	7	2	0.29	0.28	0.29	0.28	0.27	1041.01	988.42	1350.46	1080.44	1078.7	100	94.9481753	129.725939	103.787668	103.620522
sujet 5	0	0	4	3	1	0.31	0.3	0.29	0.29	0.29	1948.68	1611.52	1619.48	1681.87	1847.42	100	82.6980315	83.1065131	86.3081676	94.803662
sujet 6	2	7	8	6	2	0.28	0.23	0.12	0.17	0.22	2215.38	746.14	660.22	604.88	906.96	100	33.6800007	29.8016593	27.303668	40.939252
sujet 7	0	2	5	7	3	0.28	0.28	0.27	0.29	0.29	2129.83	2454.44	1829.37	2355.79	2656.99	100	115.241123	85.8927708	110.609297	124.751271
sujet 8	0	2	4	6	5	0.38	0.39	0.35	0.34	0.34	1316	2094.11	1912.93	1962.63	1975.24	100	159.1269	145.359422	149.136018	150.094225
sujet 9	1	3	6	5	1	0.29	0.25	0.26	0.25	0.27	1657.09	1202.44	1656.05	1175.88	1327.76	100	72.563349	99.9372394	70.9605393	80.126004
sujet 10	0	3	4	4	1	0.41	0.36	0.34	0.29	0.34	3334.22	2123.1	2390.77	1857.81	2571.36	100	63.6760622	71.7040267	55.7194786	77.120286
sujet 11	0	2	4	4	2	0.29	0.31	0.32	0.32	0.33	1544.89	1636.14	2223.71	2465.6	2593.41	100	105.906569	143.939698	159.597123	167.870204
sujet 12	2	4	8	7	5	0.33	0.31	0.28	0.3	0.32	2080.71	1562.23	1504.41	1485.58	2154.27	100	75.0815827	72.3027236	71.397744	103.535332
sujet 13	0	2	6	7	2	0.37	0.37	0.37	0.36	0.4	1611.52	1832.21	1694.69	1782.14	1667.83	100	113.694524	105.160966	109.098243	103.494217
sujet 14	0	2	4	4	2	0.36	0.35	0.35	0.36	0.38	2158.55	986.94	1310.1	1825.83	1399.1	100	45.7223599	60.6935211	84.5859489	64.8166593
sujet 15	0	2	4	4	3	0.31	0.3	0.27	0.29	0.31	2797.52	1097.34	1328.96	1469.06	1444.24	100	39.2254568	47.5049329	52.51294	51.6257256
<b>Moyenne groupe C</b>	0.33333333	2.66666667	5.53333333	5.2	2.33333333	0.31933333	0.31133333	0.292	0.29466667	0.31266667	1804.44933	1519.78	1639.716	1576.30467	1802.47733	100	96.282431	103.319091	97.8898288	112.596115
<b>écartypes groupe C</b>	0.72374686	1.87718127	1.72654348	1.42427927	1.29099445	0.04216747	0.04340287	0.05978533	0.04778922	0.0483243	679.467562	508.070234	430.79745	522.925972	541.331329	0	49.5699882	43.4467875	45.9558733	51.1731365
<b>Groupe E</b>																				
sujet 1	1	6	8	6	2	0.38	0.35	0.35	0.39	0.4	810.19	1004.92	1060.19	1006.86	1214.07	100	124.035103	130.856959	124.274553	149.850035
sujet 2	0	1	5	4	2	0.38	0.41	0.37	0.36	0.34	2017.23	1833.24	2074.83	1855.56	1989.47	100	90.8790768	102.855401	91.9855445	98.6238555
sujet 3	0	2	7	6	3	0.28	0.28	0.28	0.29	0.3	1167.02	1218.01	825.26	1171.17	1445.75	100	104.369248	70.7151548	100.355607	123.883909
sujet 4	0	5	7	2	1	0.26	0.24	0.26	0.26	0.28	1544.82	1721.55	1671.71	2359.15	1897.78	100	111.440168	108.213902	152.713585	122.847969
sujet 5	0	4	8	7	2	0.29	0.29	0.26	0.25	0.25	3651.06	2743.52	3351.89	2893.41	2879.61	100	75.1431091	91.8059413	79.2484922	87.8705198
sujet 6	0	0	5	5	2	0.31	0.3	0.3	0.28	0.29	1914.14	2156.9	964.47	905.06	1623.67	100	112.682458	50.3865966	47.2828529	84.8250389
sujet 7	0	1	2	4	0	0.31	0.31	0.29	0.31	0.31	1018.38	887.85	1816.69	2695.75	1816.69	100	87.1825841	178.390188	264.709637	178.390188
sujet 8	0	3	6	7	2	0.3	0.28	0.24	0.22	0.25	1402.47	961.55	1263.18	890.87	1179.39	100	68.5611813	90.0682368	63.5215014	84.0937774
sujet 9	2	5	7	6	2	0.24	0.23	0.22	0.25	0.24	1702.72	1507.1	1907.18	1931.34	3114.24	100	88.5113231	112.007846	113.426752	182.897952
sujet 10	0	3	6	4	2	0.29	0.31	0.3	0.29	0.32	1986.18	1865.33	1702.17	1744.31	1849.57	100	93.9154558	85.7006918	87.8223525	93.1219728
sujet 11	0	0	7	4	1	0.35	0.35	0.33	0.33	0.34	1675.09	1700.79	2296.52	1714.11	1695.21	100	101.534246	137.098305	102.329427	101.201129
sujet 12	0	1	4	6	1	0.34	0.34	0.31	0.29	0.36	2572.83	1884.72	2365.92	1823.18	2282.99	100	73.2547428	91.957883	70.8628242	88.7345841
sujet 13	0	3	4	3	1	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	2698.68	1872.72	2019.84	2392.52	2011.27	100	69.3939259	74.84548	88.6551944	74.5279174
sujet 14	0	4	5	6	2	0.29	0.31	0.29	0.3	0.3	1443.6	1830.8	2139.9	2503.87	2764.39	100	126.821834	148.233583	173.446245	191.492796
sujet 15	0	4	5	5	2	0.24	0.23	0.19	0.2	0.22	3647.95	1938.32	2490.86	3723.14	2427.05	100	53.1345002	68.2810894	102.061158	66.5318878
<b>Moyenne groupe E</b>	0.2	2.8	5.73333333	5	1.66666667	0.30733333	0.30533333	0.28933333	0.29133333	0.30266667	1950.15733	1675.15467	1863.374	1974.02	2012.74333	100	92.0572637	102.761151	110.846382	114.659569
<b>Ecartypes groupe E</b>	0.56061191	1.8973666	1.66761878	1.46385011	0.72374686	0.044955	0.05026596	0.05006662	0.05194319	0.04949266	860.625057	494.931447	662.954158	805.542598	583.050802	0	21.6054329	34.1197957	53.4840563	41.9338027
<b>Test Student</b>	0.57747193	0.84798267	0.74932629	0.70736046	0.09501286	0.45715058	0.72908128	0.89561026	0.85619923	0.57999801	0.6110515	0.40341367	0.28410602	0.12181161	0.31484915	0.7654422	0.96909082	0.48271962	0.90475	

Fexp - jambe faible (N/msec)						en % de la force exp en pré test					Force max - jambe forte (N)					en % de la fore max en pré test					Force max - jambe faible (N)					en % de la Fmax en pré test									
pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.		pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.		pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.		pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.		pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.		pré test	post test	1j. post.t.	3j. post.t.	5j. post.t.	
1502.06	1093.14	1370.29	1360.94	892.71		100	72.7760542	91.2273811	90.6049026	59.4323795		366.39	427.38	484.27	440.5	451.14		100	116.646197	132.173367	120.22708	123.13109		550.5	436.18	518.62	454.9	518.07		100	79.2334242	94.208901	82.6339691	94.1089918	
1644.13	1283.28	1419.73	1605.03	1461.74		100	78.0522221	86.3514442	97.6218426	88.906595		327.67	631.56	651.33	711.15	713.55		100	192.742698	198.776208	217.03238	217.764824		260.25	397.01	451.38	441.51	492.29		100	152.549472	173.440932	169.648415	189.160423	
889.46	1094.13	1620.52	1133	1593.68		100	123.010591	182.191442	127.380658	179.173881		391.81	276.82	504.08	422.22	516.39		100	70.6515913	128.654195	107.761415	131.796024		372.07	230.89	471.51	468.96	589.74		100	62.0555272	126.726154	126.040799	158.502432	
1174.15	860.6	1388.49	1119.46	986.09		100	73.2955755	118.254908	95.3421624	83.9833071		330.5	424.98	457.07	522.78	436.91		100	128.586989	138.29652	158.178517	132.196672		457.28	523.68	601.7	637.38	495.57		100	114.520644	131.5824	139.385059	108.373425	
1980.33	725	960.22	1360.56	1655.45		100	36.6100599	48.4878783	68.7037009	83.5946534		642.44	602.37	538.82	653.6	627.3		100	93.7628417	83.8708673	101.737127	97.6433597		452.85	314.56	421.7	488.91	607.04		100	69.4622944	93.1213426	107.962902	134.048802	
1442.47	769.24	829.91	898.03	1032.6		100	53.3279722	57.5339522	62.2564074	71.5854442		398.65	243.2	197.54	181.08	316.09		100	61.0058949	49.5522388	45.4233036	79.2901041		321.92	286.62	178.47	208.36	296.81		100	89.0345427	55.4392396	64.7241551	92.1999254	
1810.11	2222	2373.63	2076.78	2647.61		100	122.754971	131.13181	114.732254	146.267906		831.96	714.22	684.95	859.34	796		100	85.8478773	82.3296793	103.291024	95.6776768		508.48	662.04	752.34	768.14	832.28		100	130.199811	147.958622	151.065922	163.679987	
1012.04	1342.13	1502.65	2164.32	1915.26		100	132.6163	148.477333	213.85716	189.247461		522.08	454.1	666.47	697.13	602.05		100	86.979007	127.656681	133.529344	115.317576		369.45	312.4	531.81	607.21	552.07		100	84.5581269	143.946407	164.355122	149.430234	
1667.47	1151.55	1084.05	1321.48	1682.16		100	69.0597132	65.0116644	79.2506012	100.880975		471.16	434.64	483.75	505.27	527		100	92.2489176	102.672128	107.239579	111.8516		388.08	406.56	389.79	494.28	528.5		100	104.761905	100.440631	127.365492	136.183261	
2420.59	2334.12	2408	2068.22	2045.94		100	96.4277904	99.4798789	85.4428053	84.5223685		516.88	516.15	496.55	403.88	531.88		100	95.885788	96.0667853	78.1380591	102.902028		452.08	425.47	503.59	469.8	598.49		100	94.1138737	111.394001	103.91966	132.385861	
1467.09	1115.36	1706.36	2269.94	2220.47		100	76.0252921	116.309156	154.723977	151.351936		325.85	380.48	474.96	512.62	603.06		100	103.996064	129.82015	140.113705	164.833543		313.83	286.38	414.24	526.44	454.38		100	91.2532263	131.995029	167.746869	144.785393	
1685.67	1767.06	1291.56	1544.52	1465.61		100	104.828347	76.619979	91.6264749	86.9452503		576.34	531.36	523.65	659.7	743.41		100	92.195579	90.857827	114.463685	128.988097		717.43	671.63	523.96	699.95	649.24		100	93.6161019	70.0329091	97.5635254	90.49524	
1555.87	1753.17	2527.18	1668.74	1620.06		100	112.681008	162.428738	107.254462	104.125666		441.16	510.25	464.36	740.34	594.76		100	115.660985	105.258863	167.816665	134.8173		259.63	380.51	349.4	503.17	487.86		100	146.558564	134.576128	193.802719	187.905866	
1598.12	1279.6	1374.47	1356.48	1215.17		100	80.069812	86.0054314	84.8797337	76.037469		788.99	631.38	857.25	924.94	851.77		100	80.0238279	108.651567	117.23089	107.957008		516.5	737.86	585.28	707.97	685.06		100	142.857696	113.316554	137.070668	132.630464	
2789.39	1452.18	1506.18	1659.24	1785.29		100	52.0608448	53.996572	59.4839732	64.0028824		536.59	381.66	366.18	464.39	496.62		100	71.1269312	68.242047	86.5446617	92.5511098		557.41	351.98	360.39	402.27	468.82		100	63.1456199	64.6548837	72.1677042	84.1068513	
1642.59667	1349.504	1557.54933	1573.78267	1614.656		100	85.5730533	101.567183	102.210741	104.670556		500.565333	477.37	523.415333	579.929333	587.195333		100	99.4222779	109.525275	119.915162	122.447867		433.184	428.251333	470.278667	525.283333	550.414667		100	101.194722	112.055575	127.030199	133.200116	
489.12522	483.925346	511.201169	414.727072	478.573537		0	28.717852	40.8286867	39.6472078	41.4761297		156.406053	132.538805	151.176181	193.959997	144.073645		0	31.7310782	35.5641773	40.6587552	33.9158637		125.47337	154.446897	132.111041	141.095107	121.429689		0	29.9553261	33.118118	38.5325952	33.9759297	
958.07	945.89	984.78	1358.76	1860.82		100	98.7286941	102.787897	141.822623	194.225892		309.19	367.43	371.69	367.68	419.57		100	118.836314	120.214108	118.917171	135.699732		296.67	294.61	244.18	437.54	445.1		100	99.3056258	82.3609044	147.483736	150.032022	
1430.37	1495.1	1864.41	1609.49	2113.79		100	104.525403	130.344596	112.52634	147.779246		424.84	486.57	482.18	456.61	562.22		100	114.530176	113.496846	107.478109	132.33688		401.47	370.43	478.83	509.07	581.09		100	92.2684136	119.269186	126.801504	144.740578	
1236.95	775.9	743.15	1034.01	898.99		100	62.7268685	60.0792271	83.5935163	72.6779579		406.22	294.29	309.01	455.67	510.39		100	72.4459652	76.0696174	112.173207	125.64374		309.88	236.64	248.81	385.78	336.74		100	76.3650445	80.2923712	124.493352	108.667871	
1795.04	1841.33	1963.85	1768.97	2008.53		100	102.578773	109.404247	98.5476647	111.893328		518.35	584.05	532.92	733.78	603.24		100	112.674834	102.810842	141.560722	116.370965		527.34	529.86	552.07	753.7	609.27		100	100.47787	104.689574	142.924868	115.536466	
2643.24	2955.69	2143.6	2712.19	2886.18		100	111.82072	81.097441	102.608541	109.190993		744.21	800.85	978.8	1008.13	884.84		100	107.610755	131.522017	135.463109	118.896548		634.14	748.68	709.96	858.82	852.99		100	118.062258	111.95635	135.430662	134.511307	
1508.1	2048.33	1845.2	1494.41	1052.54		100	135.821895	122.352629	99.0922353	69.7924541		624.27	550.85	493.06	505.93	542.45		100	88.2390632	78.9818508	81.0434588	86.8994916		469.97	454.14	528.63	508.96	458.71		100	96.6316999	112.481648	108.296274	97.6041024	
1773.98	1316.26	1780.61	1862.5	3660.82		100	74.1981308	100.373736	104.989991	206.361966		548.93	605.54	809.29	878.8	980.19		100	110.31279	147.430456	160.093272	178.563751		519.46	593.71	607.28	690.85	997.14		100	114.29369	116.906018	132.993878	191.957032	
1977.48	1397.09	1205.79	869.71	1677.87		100	70.6500192	60.9760908	43.9807229	84.8488986		471.71	367.5	376.88	401.93	513.81		100	77.9800367	79.8965466	85.2070128	108.924975		352.47	341.83	337.16	427.11	537.14		100	96.9813034	95.6563679	121.17627	152.393111	
1533.31	1755.54	1783.62	1968.54	2709.02		100	114.493481	116.324814	128.384997	176.677906		750.84	576.52	712.3	589.98	767.13		100	76.783336	94.8670822	78.5759949	102.16957		715.61	543.95	627.23	704.1	744.59		100	76.0120736	87.6496975	89.391582	104.049692	
2491.18	1811.3	1931.41	1259.08	1452.73		100	72.7085156	77.5299256	50.5415104	58.3149351		621.41	552.56	570.31	653.08	790.63		100	88.9203585	91.7767657	105.096474	127.231618		501.64	470.91	441.51	422.71	684.26		100	93.874093	88.0133163	84.2656088	136.404593	
2017.11	2095.18	1892.87	2224.13	2941.78		100	103.870389	93.8406929	110.263198	145.841327		474.26	574.36	534.7	583.36	551.41		100	121.106566	112.744064	123.004259	116.267448		522.18	478.59	402.69	580.71	615.41		100	91.6523038	77.1170861	111.208779	117.853997	
2063.31	2036.7	1498.43	1333.03	1767.46		100	98.7103247	72.6226306	64.6063849	85.6613887		978.52	751.22	714.53	874.2	768.87		100	76.771042	73.0215019	89.3390018	78.5747864		721.61	669.64	605.96	701.24	631		100	92.7980488	83.9733374	97.1771455	87.4433558	



Force min CMJ (N)					en % de la Fmin en pré test					Force max CMJ (N)					en % de la fmax en pré test				
pré test	post test	1 i. post t.	3 i. post t.	5 i. post t.	pré test	post test	1 i. post t.	3 i. post t.	5 i. post t.	pré test	post test	1 i. post t.	3 i. post t.	5 i. post t.	pré test	post test	1 i. post t.	3 i. post t.	5 i. post t.
212.45	266.18	266.03	249.5	271.87	100	125.290657	125.220052	117.439398	127.968934	1057.26	1432.9	1328.82	1431.54	1404.39	100	135.529576	125.685262	135.400942	132.832983
497.64	599.12	630.09	608.29	512.77	100	120.392251	126.615626	122.234949	103.04035	1811	1705.64	1745.4	1707.03	1668.4	100	94.1822198	96.3776919	94.2589729	92.1258973
221.38	258.41	321.87	359.72	221.08	100	116.726895	145.392538	162.489836	99.8644864	2343.66	2385.01	2222.64	2054.71	2185.15	100	101.764334	94.8362817	87.6709932	93.236647
349.19	234.9	320.56	250.14	295.76	100	67.2699676	91.8010252	71.6343538	84.6988745	1722.94	1798.97	1615.79	1650.36	1605.82	100	104.412806	93.780979	95.7874331	93.202317
510.32	477.64	484.65	450.22	397.6	100	93.5961749	94.9698229	88.2230757	77.9118984	1706.37	1783.62	1846.79	1801	1778.39	100	104.527154	108.229165	105.545691	104.220656
402.1	299.77	366.32	285.23	285.96	100	74.5511067	91.101716	70.9350908	71.1166377	1218.16	1223.22	1098.42	1128.52	1266.11	100	100.415381	90.170421	92.6413607	103.936265
301.08	329.69	217.67	335.87	235.11	100	109.502458	72.2963996	111.555068	78.08888	1654.32	1631.35	1660.26	1659.7	1772.64	100	98.6115141	100.35906	100.325209	107.152183
181.01	162.18	263.67	224.26	196.67	100	89.5972598	145.665985	123.893708	108.651456	1848.53	2001.5	1921.39	1872.98	1775.85	100	108.275224	103.94151	101.322673	96.0682272
371.02	364.95	383	375.1	345.94	100	98.3639696	103.228936	101.099671	93.2402566	1444.76	1466.81	1485.9	1522.68	1518.47	100	101.526205	102.847532	105.393283	105.101885
352.57	445.21	428.21	392.37	342.84	100	126.275633	121.453896	111.288538	97.2402643	1584.82	1592.89	1561.32	1502.09	1545.93	100	100.509206	98.5171818	94.7798488	97.5460936
253.07	223.18	212.75	188.23	196.71	100	88.1890386	84.0676493	74.3786304	77.729482	1706.44	1869.67	1801.65	1817.66	1770.4	100	109.565528	105.579452	106.517663	103.748154
314.94	340.75	369.39	426.23	374.3	100	108.195212	117.289007	135.33689	118.848035	1427.21	1457.76	1414.83	1363.56	1477.51	100	102.14054	99.1325733	95.5402499	103.524359
106.79	137.03	92.01	101.28	77.15	100	128.317258	86.1597528	94.8403409	72.2445922	2143.87	1916.54	1986.09	2009.31	2108.68	100	89.3962787	92.640412	93.7235	98.3585758
241.66	164.9	215.93	178.85	153.49	100	68.2363651	89.3528097	74.0089382	63.5148556	1522.78	1831.29	1626.05	1617.01	1778.43	100	120.259657	106.781676	106.188025	116.788374
262.63	293.21	265.31	265.17	171.42	100	111.643757	101.020447	100.96714	65.2705327	1457	1488.84	1430.56	1497.49	1494.7	100	102.185312	98.1853123	102.778998	102.587509
305.19	306.474667	322.497333	312.697333	271.911333	100	101.7432	106.375711	104.021709	89.2953023	1643.27467	1705.734	1649.72733	1642.376	1676.72467	100	104.886729	101.137634	101.191656	103.362008
112.155899	126.804409	130.19212	127.89879	111.12412	0	20.8638639	22.5976585	26.3089884	19.6324553	326.091369	285.591464	284.460359	247.86935	247.328698	0	10.9479098	8.637223	11.1018362	10.3926194
163.05	173.24	152.62	119.35	127.2	100	106.249617	93.6031892	73.1984054	78.0128795	1412.88	1374.2	1195	1221.92	1281.08	100	97.2623294	84.5790159	86.484344	90.6715362
356.86	288.02	224.33	236.4	242.15	100	80.7095219	62.8621869	66.2444656	67.8557417	1422.96	1453.86	1431.71	1416.23	1468.79	100	102.17153	100.614915	99.5270422	103.220751
553.68	567.24	620.01	537.88	510.53	100	102.449068	111.979844	97.1463661	92.2066898	1582.7	1602.68	1544.75	1674.21	1718.51	100	101.2624	97.6021988	105.781892	108.580906
503.28	533.4	578.88	578.26	537.5	100	105.98474	115.021459	114.898267	106.799396	1509.97	1534.47	1570.44	1488.98	1587.26	100	101.622549	104.004715	98.6099062	105.118645
368.76	428.61	379.39	383.23	308.56	100	116.230068	102.882634	103.923961	83.675019	1696.74	1665.39	1656.22	1683.53	1711.36	100	98.1523392	97.611891	99.2214482	100.861652
431.71	398.72	375	370.82	387.94	100	92.3582961	86.8638669	85.8956244	89.8612494	1922.5	2012.7	1972.8	1896.1	1958.29	100	104.691808	102.616385	98.626788	101.861638
273.68	390.9	366.8	414.62	359.06	100	142.831044	134.025139	151.4981	131.197018	1507.26	1391.39	1415.91	1410.51	1467.88	100	92.3125406	93.9393336	93.5810676	97.3873121
410.82	477.38	563.14	563.35	509.49	100	116.201743	137.077065	137.128183	124.017818	1427.63	1539.57	1554.83	1681.96	1782.72	100	107.840967	108.909872	117.81484	124.872691
366.25	325.96	317	286.45	280.41	100	88.9993174	86.552901	78.2116041	76.5624573	1182.41	1311.18	1311.04	1378.56	1425.71	100	110.890469	110.878629	116.589	120.576619
437.36	497.35	467.25	475.83	486.89	100	113.716389	106.834187	108.795958	111.324767	1602.85	1570.24	1535.99	1557.34	1504.54	100	97.965499	95.8286802	97.1606825	93.8665502
276.37	170.24	235.42	182.9	155.34	100	61.5985816	85.182907	66.1793972	56.2072584	1416.16	1378.14	1485.07	1399.24	1413.78	100	97.3152751	104.865976	98.8052197	99.8319399
278.39	309.36	336.22	255.13	227.89	100	111.124681	120.773016	91.6448148	81.8599806	1661.59	1567.63	1556.54	1562.82	1692.11	100	94.3451754	93.6777424	94.0556936	101.836795
320.77	407.09	425.47	448.94	447.34	100	126.910247	132.640209	139.956979	139.458179	1348.56	1468.96	1357.35	1426.72	1391.81	100	108.928042	100.651806	105.795812	103.207125
139.86	238.49	177.84	302.84	262.63	100	170.520521	127.155727	216.530817	187.780638	2405.9	2269.74	2152.45	2100.69	1978.59	100	94.3405794	89.4654807	87.3141028	82.2390789
655.66	656.25	707.66	672.54	706.16	100	100.089986	107.93094	102.574505	107.702163	1915.11	1767.09	1686.11	1739.96	1701.45	100	92.2709401	88.0424623	90.8543112	88.8434607
369.1	390.816667	395.135333	388.569333	369.939333	100	109.064921	107.425685	108.92183	102.301417	1601.01467	1593.816	1561.74733	1575.918	1605.592	100	100.091496	98.2192736	99.3481433	101.53178
138.34332	142.2056	166.496558	159.298335	161.522521	0	25.6961698	21.4139197	39.7196689	33.4981451	298.854301	257.189741	242.984665	226.143667	207.690754	0	5.95050706	7.53491914	9.1461724	11.0399877
0.17599574	0.09763953	0.1945261	0.16191608	0.06426969		0.39918216	0.89701126	0.69385557	0.20759811	0.71416609	0.26906866	0.37035752	0.44948535	0.40110234		0.15055931	0.33267818	0.62364681	0.64376483

## 12. Remerciements

Ce projet d'étude n'aurait pas pu être réalisé sans le soutien de plusieurs personnes. Je tiens tout d'abord à remercier mon co-conseiller M. Alain Rouvenaz, qui m'a toujours fort bien guidé et conseillé tout au long du travail. Ces remerciements vont aussi à mon conseiller M. Wolfgang Taube pour son soutien à l'ensemble du projet. Un énorme merci aux trente sujets qui ont répondu positivement à l'annonce et ont accepté de participer au test de cette étude, malgré les inconvénients que cette expérience pouvaient engendrer. Je remercie également la faculté des Sciences du Mouvement et du Sport, du Département de médecine de l'Université de Fribourg d'avoir mis à disposition le matériel et l'espace indispensables à la réalisation de ce projet. Je tiens en particulier à adresser de sincères remerciements à M. Martin Keller, qui m'a aidé à utiliser les instruments de recherche et à traiter de nombreuses données statistiques. Un merci tout spécial s'adresse également à Donato Stefanelli, de la firme Compex Médical SA, qui m'a généreusement fourni les appareils d'électrostimulation nécessaires à la réalisation du test de cette étude. Enfin, j'aimerais remercier chaleureusement ma famille et mes amis qui m'ont soutenu de quelque manière que ce soit tout au long de cette expérience.