

Travail de Master pour l'obtention du titre Master of Science
Unité « Sciences du Mouvement et du Sport »
Université de Fribourg

L'électrostimulation comme principe de récupération à une charge d'endurance d'intensité modérée

*« Réponses physiologiques et perceptives à court terme liées à l'utilisation d'un programme
d'électrostimulation conçu pour la récupération »*



Conseiller : Prof. Dr. Wolfgang Taube

Co-conseiller : Alain Rouvenaz

Travail réalisé par

Julien Pasquier

Août 2012

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE ET SITUATION DE DÉPART	1
1.2	PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	3
2	PARTIE THÉORIQUE	4
2.1	HISTORIQUE DE LA STIMULATION ÉLECTRIQUE.....	4
2.2	CONCEPT GÉNÉRAL DE L'ÉLECTROSTIMULATION TRANSCUTANÉE	7
2.3	ELECTROSTIMULATION ET CELLULE MUSCULAIRE STRIÉE	8
2.3.1	<i>Le principe d'excitabilité.....</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Les principes de rhéobase et chronaxie.....</i>	<i>8</i>
2.4	LES PROPRIÉTÉS DE L'ÉLECTROSTIMULATION.....	10
2.4.1	<i>Etats et types de courants.....</i>	<i>10</i>
2.4.2	<i>Direction du courant.....</i>	<i>11</i>
2.4.3	<i>Paramètres et caractéristiques des impulsions.....</i>	<i>12</i>
2.4.4	<i>Choix et positionnement des électrodes.....</i>	<i>14</i>
2.4.5	<i>Paramètres optimaux et domaines d'utilisation dans le sport.....</i>	<i>15</i>
2.5	TYPES DE FIBRES MUSCULAIRES ET RECRUTEMENT PAR ÉLECTROSTIMULATION	16
2.5.1	<i>Ordre d'activation des unités motrices lors d'une contraction volontaire</i>	<i>17</i>
2.5.2	<i>Ordre d'activation des unités motrices lors de l'électrostimulation</i>	<i>18</i>
2.6	FATIGUE ET RÉCUPÉRATION MUSCULAIRE	20
2.6.1	<i>L'effort et la fatigue musculaire</i>	<i>20</i>
2.6.2	<i>Le principe de la récupération</i>	<i>22</i>
2.7	L'ÉLECTROSTIMULATION ET LA RÉGÉNÉRATION MUSCULAIRE.....	23
2.7.1	<i>Etats des travaux préliminaires et connaissances actuelles</i>	<i>24</i>
2.8	LITTÉRATURE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	27
3	MÉTHODOLOGIE	28
3.1	POPULATION DE L'ÉTUDE.....	28
3.2	CRITÈRES DE QUALITÉ	28
3.3	PROTOCOLE DE TEST	29
3.3.1	<i>Test de VMA.....</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Test d'endurance sur tapis roulant.....</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Tests de sauts avec le « Myotest Pro».....</i>	<i>33</i>
3.3.4	<i>Sauts de réactivité (pliométrie).....</i>	<i>34</i>
3.3.5	<i>Sauts de détente (CMJ).....</i>	<i>36</i>

3.3.6	<i>Protocole et préparation aux tests de sauts</i>	37
3.3.7	<i>Séance d'électrostimulation avec le « Compex Runner »</i>	38
3.3.8	<i>Présentation de la fonction récupération active de l'appareil</i>	39
3.3.9	<i>Paramétrages et protocole de la séance d'électrostimulation</i>	40
3.3.10	<i>Séance de récupération passive</i>	41
3.3.11	<i>Présentation et utilisation du questionnaire perceptif</i>	41
3.3.12	<i>Traitement des résultats des tests de sauts et du questionnaire</i>	42
3.4	ANALYSE STATISTIQUE	43
3.5	DESIGN DE L'ÉTUDE.....	43
4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	44
4.1	RÉSULTAT GLOBAUX.....	44
4.2	RÉSULTATS COMPARATIFS POUR LES SAUTS CMJ	46
4.3	RÉSULTATS COMPARATIFS POUR LES SAUTS DE RÉACTIVITÉ	49
4.4	RÉSULTATS COMPARATIFS POUR LE QUESTIONNAIRE PERCEPTIF.....	52
5	DISCUSSION	56
5.1	RÉSULTATS DES TESTS DE SAUTS	56
5.1.1	<i>Homogénéité entre les deux groupes de test</i>	56
5.1.2	<i>Comparaison de la tendance entre la deuxième et la troisième phase de test</i>	57
5.2	RÉSULTAT DU QUESTIONNAIRE PERCEPTIF.....	59
5.3	RÉSULTATS ET LIENS AVEC LES CONNAISSANCES ACTUELLES.....	60
5.4	POINTS FORTS DE L'ÉTUDE.....	61
5.5	LIMITES DE L'ÉTUDE.....	62
5.5.1	<i>Myotest Pro</i>	62
5.5.2	<i>Protocole de sauts et séance d'électrostimulation</i>	62
5.5.3	<i>Séance d'endurance et fibres musculaires</i>	63
5.6	PERSPECTIVES DE NOUVELLES QUESTIONS DE RECHERCHE	64
6	CONCLUSION	65
7	REMERCIEMENTS	66
8	BIBLIOGRAPHIE	67
9	TABLE DES ILLUSTRATIONS	73
10	DÉCLARATION PERSONNELLE	77
11	DROITS D'AUTEUR	78
12	ANNEXES	79

Résumé

Introduction / Objectifs : Lorsque le corps humain est soumis à certains types d'efforts physiques, le ou les groupes musculaires sollicités ont besoin d'une période de repos variable afin de récupérer. Pour tenter d'accélérer ce processus de régénération, les acteurs de la sphère sportive ont développé diverses méthodes dont l'électrostimulation. Cette technique devenue courante possède selon des croyances souvent empiriques, la capacité d'améliorer le potentiel de récupération musculaire en générant des influx électriques sur le ou les groupes musculaires ciblés.

Cette recherche a pour objectif d'évaluer ce potentiel à court terme en intégrant deux facteurs : un premier d'ordre physiologique et un deuxième d'ordre perceptif qui ensemble devraient permettre de distinguer les véritables effets de ce procédé.

Méthode : 20 étudiants en sciences du sport de l'Université de Fribourg sont répartis dans deux groupes, un groupe de contrôle (C) et un groupe expérimental (E). Après avoir mesuré leur indice VMA, les sujets des deux groupes sont convoqués à une séance test en laboratoire. A l'aide de l'appareil « Myotest Pro », les qualités contractiles des membres inférieures sont évaluées initialement par deux types de sauts (CMJ et réactif). S'en suit une séance d'endurance modérée sur tapis roulant de 20 minutes à 75% de la VMA. En guise de récupération, le groupe C effectue une séance passive et le groupe E prend part à un programme d'électrostimulation axé sur les quadriceps (Compex Runner). Après coup, les tests de sauts initiaux sont répétés à deux reprises. Parallèlement, un questionnaire perceptif examine le ressenti des sujets en termes de douleur musculaire, de fatigue musculaire et de bien-être au cours de la séance de test.

Résultats/Conclusion : Parmi les indicateurs de performances musculaires, aucun indice statistique ne révèle de différences significatives ($p > 0.05$) pour les variables mesurées par les tests de sauts. Seule une légère tendance positive se dégage pour le groupe expérimental. En revanche, les résultats du questionnaire perceptif suggèrent que l'électrostimulation joue un rôle sur le bien-être des sujets ($p < 0.05$) de même que sur la fatigue ressentie mais dans une moindre mesure. Au final, cette étude rejoint les propos de la littérature actuelle qui, lorsqu'elle attribue des vertus à cette technique, évoque plus de valeurs perceptives que physiologiques. Toutefois, il n'existe aucune contre-indication à cette méthode qui, comme dans notre recherche, paraît préférable à une récupération passive synonyme d'inactivité musculaire.

1 Introduction

1.1 Contexte et situation de départ

A partir du milieu du XX^e siècle, l'évolution et la professionnalisation du sport de compétition ont amené de nombreux changements au sein de la sphère sportive. De meilleures connaissances physiologiques ont permis de mieux quantifier les charges de travail et d'améliorer leur efficacité (Vanderthommen, Makrof, Demoulin, 2010). Les progrès technologiques et matériel ont donné un plus grand confort à l'athlète dans son quotidien ainsi qu'une plus grande précision de suivi pour l'entraîneur. Mais cette progression a aussi eu pour conséquence d'élever le niveau de la performance sportive et de rendre plus difficile l'accès aux plus hautes marches de la compétition.

Pour y parvenir, les sportifs se sont astreints à d'innombrables heures d'entraînements durant une longue phase préparatoire. Les charges auxquelles les athlètes s'exposent durant cette période induisent inévitablement une fatigue neuromusculaire accrue, accompagnée le plus souvent par une baisse de performance. Ce stade transitoire de la structure neuromusculaire de l'athlète peut s'étendre de quelques minutes (court terme) jusqu'à plusieurs jours (moyen terme) après la charge induite par l'effort initial (Martin, Millet, Lattier, Perrod, 2004 cités par Babault, Cometti, Maffiuletti & Deley, 2011). Par ailleurs, cette phase de récupération est encore plus cruciale lorsqu'il s'agit de sportifs d'élites s'astreignant à un volume d'entraînement considérable de l'ordre de plusieurs charges journalières (Vanderthommen et al. 2010 ; Babault et al. 2011). De ce fait, il est primordial pour l'athlète d'utiliser les instants de repos disponibles à bon escient et de considérer que le cycle de récupération constitue une des clés du processus d'entraînement (Vanderthommen et al. 2010 ; Babault et al. 2011).

Pour combler ce déficit et tenter de réduire significativement le temps de régénération musculaire, les athlètes et les entraîneurs appliquent différentes méthodes de récupération actives ou passives comme le stretching, la cryothérapie, les massages, les footings de basse intensité, le sauna, l'immersion en eau chaude ou, depuis une vingtaine d'années, l'électrostimulation.

Cette dernière technique connaît notamment un succès grandissant par le biais de l'électromyostimulation (EMS) ou plus communément appelée NMES (Neuromuscular electrical stimulation) dans le domaine sportif international. Ce procédé connu depuis la fin du XVII^e (Gondin, Cozzone, Bendahan, 2011) a pour but de stimuler artificiellement le muscle squelettique à l'aide d'un courant électrique de faible tension issu d'électrodes positionnées à la surface de la peau. Cette technique a comme avantage d'être totalement inoffensive et de ne pas être invasive. A la base principalement utilisée dans le domaine médical et celui de la rééducation pour traiter de nombreuses pathologies musculaires (Ziltener, Chantraine, 1996), elle a vu son domaine d'application se diversifier grandement au cours des vingt dernières années (Bax, Staes, Verhagen, 2005). Grâce aux progrès technologiques et à leur transportabilité facilitée, les appareils d'électrostimulation sont désormais disponibles pour tous les sportifs.

A l'heure actuelle, plusieurs grandes sociétés se partagent le marché mondial et celles-ci multiplient les campagnes de promotions vantant les mérites de leurs diverses gammes de produits. Cette notoriété croissante a aussi engendré de nombreux débats au sein de la communauté scientifique et continue d'alimenter certaines controverses et ambiguïtés. Entre certaines évaluations positives et négatives, il est toujours délicat de porter un jugement précis sur cette thématique. Vanderthommen et Duchateau (2007) lors d'une étude à caractère rétrospectif et synthétique, concluent que ce procédé demeure un bon outil complémentaire à l'exercice volontaire mais qu'il est nécessaire d'y accorder une grande hétérogénéité interindividuelle et d'utiliser des paramétrages adéquats étant donné l'importance qu'ils occupent (Gondin et al. 2011 ; Maffioletti, 2010). Plusieurs études se montrent aussi critiques envers la diversité des méthodologies utilisées dans leur design ainsi qu'aux réglages multiples parmi les paramètres présentés (Ziltener, Chantraine, 1996 ; Parker, Bennett, Hieb, Hollar, Roe, 2003 ; Vanderthommen, Duchateau, 2007 ; Dehail, Duclos, Barat, 2008, Gondin et al. 2011, Babault et al. 2011). Ces discordances font qu'il est particulièrement délicat de comparer les résultats obtenus entre les différentes études (Ziltener, Chantraine, 1996). Les conclusions révèlent donc souvent des réponses incertaines en émettant des réserves quant à la fiabilité des valeurs trouvées et suggèrent des recherches plus approfondies. Ces conflits scientifiques ont fréquemment poussé les entraîneurs ou les

kinésithérapeutes à utiliser l'électrostimulation sur des fondements empiriques et sur des croyances personnelles (Vanderthommen, Duchateau, 2007).

Pour leur part, les concepteurs continuent d'innover en matière de produits et de varier les possibilités d'utilisation. Echauffement, antidouleur, récupération, renforcement musculaire, réhabilitation, voici leurs domaines d'application principaux et ceux-ci se divisent en de nombreux programmes personnalisés selon le désir du client.

1.2 Problématique et questions de recherche

Entre l'efficacité réelle de l'électrostimulation et le marché lucratif qui s'étend à son tour, il serait judicieux d'examiner les véritables valeurs de ces nouvelles technologies présentes sur le marché et de mieux cerner leur incidence. L'objectif de ce travail est d'apporter une précision supplémentaire sur les propriétés et les éventuels bénéfices apportés par l'électrostimulation et plus précisément sur la capacité de récupération post-effort à court terme.

L'hypothèse retenue pour cette recherche est que l'utilisation d'un programme de récupération active par électrostimulation appliqué après un effort d'endurance de moyenne intensité permettrait d'accélérer la régénération musculaire à court terme. Par conséquent, deux questions de recherches en lien avec cette thématique ont été retenues :

Est-ce que l'électrostimulation permet d'accélérer le processus de régénération du muscle à court terme après une charge d'endurance en aérobie de moyenne à haute intensité ?

Dans quelle mesure l'électrostimulation utilisée comme technique de récupération post-exercice permet-elle de réduire la perception de la fatigue musculaire à court terme ?

2 Partie théorique

2.1 Historique de la stimulation électrique

Les prémices de la stimulation électrique ont débuté durant l'Antiquité. A cette époque, les propriétés électriques de certains poissons étaient utilisées pour soigner des douleurs localisées ou des maladies comme les maux de têtes et la goutte par un effet engourdissant sur les zones douloureuses (Dolhem, 2008). Mais pour réellement entrer dans le vif du sujet, il faut attendre la fin du XVIII^e siècle et l'arrivée de deux personnages symboliques et révolutionnaires dans le domaine de l'électricité, Luigi Galvani¹ et Alessandro Volta². En 1786, Galvani mit en évidence l'existence d'une électricité animale au sein des tissus (Dolhem, 2008) par une série d'expériences réalisées sur des grenouilles. Selon lui, l'application d'une tige bimétallique sur un nerf et un muscle provoquerait une décharge électrique de celui-ci vers la tige. Volta, pour sa part, réfuta les propos de Galvani en démontrant que ce n'était pas le muscle qui était responsable de la décharge mais bien la tige composée de deux métaux différents (Portman, 1991). Quatorze ans plus tard, Volta fut aussi l'inventeur de la première pile à colonne, qui rendit l'utilisation de l'électricité bien plus aisée (voir Fig. 1).

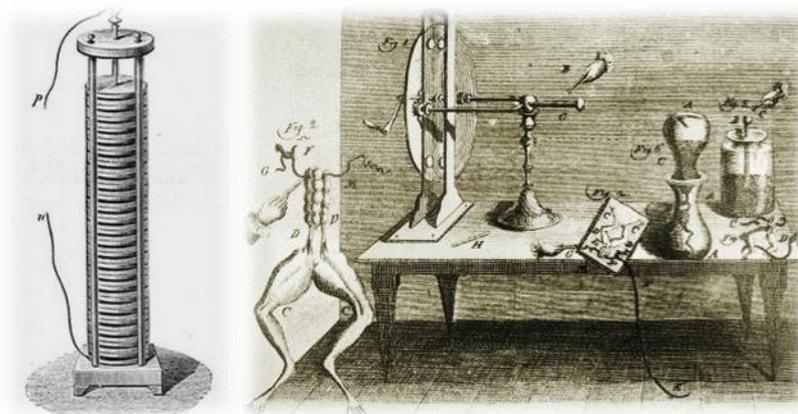


Fig. 1 : pile à colonne d'Alessandro Volta et expériences sur des grenouilles par Luigi Galvani

Ce n'est qu'à ce moment-là que les premiers appareils électriques destinés à l'usage médical ont été élaborés. Dès lors, plusieurs médecins se sont essayés à cette technique pour lutter contre différentes pathologies comme la paralysie, la surdité, l'asphyxie ainsi

¹ Luigi Galvani, 1737-1798, médecin et physicien italien. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani, consulté le 3 avril 2012

² Alessandro Volta, 1745-1827, physicien italien. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta, consulté le 3 avril 2012

que les rhumatismes chroniques (Dolhem, 2008). Malheureusement l'utilisation de ces appareils n'a été que passagère puisqu'ils étaient très onéreux et nécessitaient surtout des révisions constantes. Pour percevoir une nouvelle avancée, il fallut attendre 1831 et la construction des premiers appareils à induction volta-faradiques et magnéto-faradiques par Michael Faraday³ (Portmann, 1991). Lors de leurs apparitions, ces nouvelles inventions ont permis de donner un nouvel élan à l'approche de l'électricité et de l'électrothérapie en particulier (Dolhem, 2008). En 1856, Hugo von Ziemssen un médecin Allemand s'illustra en rapportant le premier cas de réanimation respiratoire par secousses faradiques appliquées sur le nerf phrénique (Dolhem, 2008). Plus tard, ce domaine connut une vive polémique entre deux brillants esprits, Guillaume-Benjamin Duchenne⁴, surnommé Duchenne de Boulogne, et Robert Remak⁵. Le premier a dédié une longue partie de sa vie à l'étude de la physiologie des mouvements grâce à l'électrisation localisée. Pour sa part, Remak fit une découverte remarquable en 1858 lorsqu'il démontra la présence de points moteurs musculaires. Il a aussi longtemps critiqué les travaux de Duchenne sur la faradisation qui selon lui pouvaient avoir des effets « hyposthénisants ⁶ ». Malgré de nombreux débats, la pratique de l'électrostimulation fut de plus en plus couramment utilisée dans le milieu médical et notamment en neurologie. A la fin du XIX^e siècle, la technique connaît un attrait considérable, des manuels ainsi que de nouveaux appareils portatifs cette fois-ci, voient le jour (Dolhem, 2008). En 1909, Louis Lopicque⁷ invente et définit les termes fondamentaux de chronaxie et de rhéobase (Dolhem, 2008). Quelques années plus tard, Arsène d'Arsonval⁸ fit la découverte des courants à hautes fréquences. On révèle aussi l'existence de points moteurs musculaires, correspondant à la projection sur la peau de zones d'épanouissement du nerf à l'intérieur du muscle (Dolhem, 2008). Étonnamment, entre 1930 et 1935, on assiste à un désintérêt du personnel médical envers la stimulation électrique (Blondel, 1994 cité par Dolhem, 2008).

³ Michael Faraday, 1791-1867, physicien et chimiste britannique. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday, consulté le 3 avril 2012

⁴ Guillaume-Benjamin Duchenne, 1806-1875, médecin neurologue français. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Guillaume_Duchenne_de_Boulogne, consulté le 3 avril 2012

⁵ Robert Remak, 1815-1865, physiologiste, embryologiste et neurologue allemand. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Robert_Remak, consulté le 3 avril 2012

⁶ Définition : affaiblissement du fonctionnement de certains tissus ou organes, diminution du tonus nerveux. Source : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hyposthénie/>, consulté le 3 avril 2012

⁷ Louis Edouard Lopicque, 1866- 1952, médecin et physiologiste français, spécialisé dans le système nerveux. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Lopicque, consulté le 3 avril 2012

⁸ Arsène d'Arsonval, 1851-1940, médecin, physicien et inventeur français. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Arsène_d'Arsonval, consulté le 3 avril 2012

En 1947, le rapport de la première réanimation cardio-pulmonaire sur un animal réalisé par Albert Hyman⁹ réhabilite l'utilisation de l'électricité dans le domaine médical (Portmann, 1991). C'est d'ailleurs ce personnage qui fut le précurseur des stimulateurs cardiaques implantés en 1958 (Portmann, 1991).

A l'avenir, on s'intéresse également aux effets des stimulations magnétiques transcrâniennes sur certaines zones précises du cerveau et sur des patients atteints de dépressions majeures et de mélancolie (Bourguignon, 1964, cité par Dolhem, 2008). Cette technique reste d'actualité de nos jours puisqu'elle porte le nom de TMS (Transcranial Magnetic Stimulation). Les années 1960 sont à nouveau synonymes de régression pour l'électrothérapie et celle-ci balance dorénavant entre la médecine physique, la rhumatologie et la kinésithérapie (Dolhem, 2008). Il faudra attendre l'arrivée des premiers microprocesseurs et des circuits intégrés pour donner un nouvel élan à cette discipline et pour construire des générateurs miniaturisés (Dolhem, 2008). L'intérêt qui était alors européen devient de plus en plus américain et l'on assiste à une diversification marquée des domaines d'application : ostéogénèse, rééducation, stimulations musculaires après paralysies, stimulation antalgique (De Bisschop, DuMoulin, 1991, cités par Dolhem, 2008). Le concept de stimulation électrique fonctionnelle (SEF) est notamment apparu à cette époque. Les premières apparitions de l'électrostimulation dans le domaine sportif suivent à la fin des années 1980 lorsque la SEF est utilisée pour lutter contre l'atrophie musculaire due à l'immobilisation et à l'impossibilité d'effectuer des contractions musculaires volontaires. Actuellement, la dénomination SEF a laissé place à la SEEM (Stimulation Electriques Excitomotrices) et cette terminologie particulière se rattache principalement au milieu de la réhabilitation médicale. Sur la scène scientifique et sportive, on préfère désormais les appellations EMS (Electromyostimulation), NMES (Neuromuscular Electrical Stimulation), ou encore TENS (Transcutaneous Electrical Nerv Stimulation) lorsqu'il s'agit de traitements antalgiques.

En ce qui concerne la suite de l'évolution, les techniques d'électrostimulation se sont largement répandues au milieu des années 1990. A partir de là, certaines entreprises se sont spécialisées dans la confection d'appareils spécifiques pour le domaine sportif.

⁹ Albert Hyman, 1893-1972, cardiologue new yorkais. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Albert_Hyman, consulté le 3 avril 2012

Premièrement destinés aux sportifs de haut niveau, ces dispositifs ont subi de nombreuses améliorations et se sont rapidement diffusés chez les amateurs. A présent, les personnes désireuses de connaître les valeurs de l'électrostimulation neuromusculaire disposent d'un vaste choix commercial pour s'adonner à cette pratique.

2.2 Concept général de l'électrostimulation transcutanée

La stimulation électrique transcutanée s'effectue par le biais d'électrodes placées à la surface de la peau en fonction des points moteurs musculaires. Les appareils auxquels les électrodes sont reliées par câbles ou récemment par réseau sans fil (Wireless), transmettent des impulsions électriques ajustables vers la zone sensible de l'électrode. Les impulsions provoquent alors la dépolarisation des branches axonales et terminales des nerfs moteurs suivies par un transfert aux fibres musculaires conduisant à une contraction du ou des muscle(s) sollicité(s) (Vanderthommen, Duchateau, 2007). Cette forme de contraction n'est en aucun cas comparable à une contraction volontaire d'un muscle (voir Fig. 2). Lorsqu'une personne en bonne santé et ne présentant aucune lésion au niveau cortical et spinal désire exécuter un mouvement, le trajet de cette commande débute au niveau des aires cérébrales motrices et suit un chemin le long des voies corticales et spinales à travers les faisceaux pyramidaux et extrapyramidaux pour enfin activer le/les motoneurone(s) responsable(s) du ou des muscle(s) excité(s).

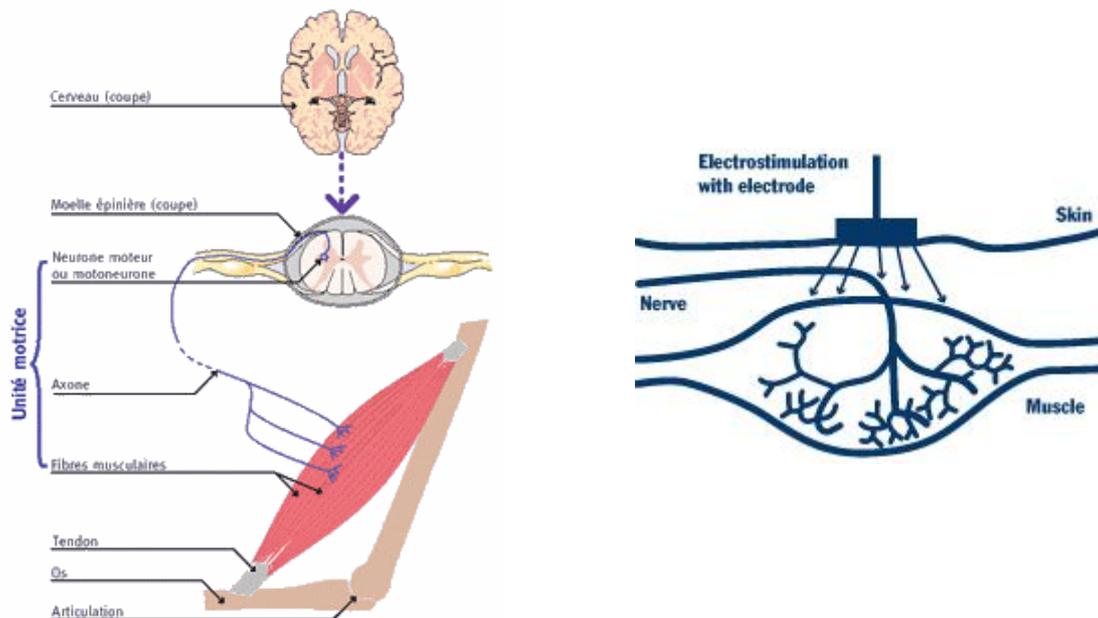


Fig. 2 : comparaison entre le trajet de l'influx nerveux lors d'une contraction volontaire (gauche) et celle émise par un courant électrique par le biais d'une électrode placée sur la peau (droite)

Lors d'une contraction artificielle par électrostimulation, le courant électrique est le seul responsable de la contraction musculaire par son action sur les points moteurs. Ceci engendre directement une réponse au niveau des fibres par le biais de l'axone et non du corps cellulaire comme c'est le cas pour une contraction volontaire (voir Fig. 2 p. 7).

2.3 Electrostimulation et cellule musculaire striée

Pour que la stimulation électrique transcutanée produise une contraction musculaire efficace et que celle-ci soit utilisée dans un but précis, il est nécessaire de contrôler et d'ajuster plusieurs paramètres et de respecter certaines propriétés biologiques. Les prochains points spécifient les éléments essentiels de la stimulation électrique ainsi que les conditions commandées par les propriétés de la structure musculaire.

2.3.1 Le principe d'excitabilité

Les lois agissant sur les structures nerveuses et musculaires sont pour ainsi dire identiques. « L'excitation définit l'état d'activité d'une fibre nerveuse ou musculaire, elle s'accompagne de deux phénomènes principaux » (Fahri, Smadja, 1996, p. 90-91):

- **Electriques** : formation et propagation d'un potentiel d'action
- **Ioniques** : modification de la perméabilité membranaire aux ions (Na^+ et K^+ essentiellement)

Les causes de l'excitation de la musculature striée chez l'homme peuvent être variables : chimique, mécanique, optique etc. (Fahri, Smadja, 1996). L'électrostimulation, quant à elle, propage un stimulus d'ordre électrique. Celui-ci produit alors deux types de contractions isométriques sur le muscle : une secousse élémentaire ou une téτανisation. Pour comprendre le mécanisme qui s'active durant ce processus, il est important de revenir sur deux principes qui ont déjà été évoqués dans le point 2.1 mais il est préférable de les définir en détail étant donné l'importance cruciale qu'ils revêtent durant la stimulation électrique transcutanée.

2.3.2 Les principes de rhéobase et chronaxie

Lors d'une stimulation électrique, la fibre musculaire squelettique réagit par rapport à deux variables distinctes, l'intensité de la stimulation appliquée ainsi qu'à son temps qualifié de durée d'impulsion. Pour parvenir à créer une contraction musculaire, il est

nécessaire de créer une impulsion électrique supérieure au seuil d'excitation de la membrane plasmique neuronale et d'appliquer ce stimulus durant un laps de temps suffisant, afin de déclencher un potentiel d'action au niveau de celle-ci. Cette règle constitue le premier principe qui détermine le seuil absolu de l'excitabilité et qui porte le nom de rhéobase ou seuil liminaire. Il se traduit par l'intensité de courant au-dessous de laquelle aucun potentiel d'action n'est déclenché et cela quelle que soit la durée de l'impulsion électrique. A noter aussi que certaines fibres musculaires possèdent un seuil « liminaire » plus élevé que d'autres et s'activent seulement si le stimulus extrinsèque (ici influx électrique) augmente à son tour (Fahri, Smadja, 1996).

En électrophysiologie, le degré d'excitation et de dépolarisation d'une cellule musculaire dépend donc d'une loi que l'on qualifie « du tout ou du rien ». C'est-à-dire qu'il n'existe aucune zone transitoire entre l'activation et la désactivation (Portmann, 1991,). Il ne faut pas oublier non plus que l'apparition d'un potentiel d'action est suivi d'une période réfractaire due à la position fermée des canaux sodiques. Un instant de repos est de ce fait indispensable à la création d'un nouveau potentiel d'action.

Le second principe est aussi fonction de l'intensité mais surtout de la durée de stimulation. En effet, pour qu'une contraction puisse se produire, il faut d'une part atteindre le seuil de la rhéobase mais aussi que celui-ci soit maintenu durant un laps de temps suffisant. « Il existe donc un rapport (voir Fig. 3) entre la durée de l'excitation et le seuil d'excitation : c'est la chronaxie. La chronaxie est le temps de passage du courant, pour obtenir une contraction lorsqu'on excite le muscle avec un courant électrique d'intensité double de l'intensité seuil. » (Nguyen, Bourouina, 2008, p. 154).

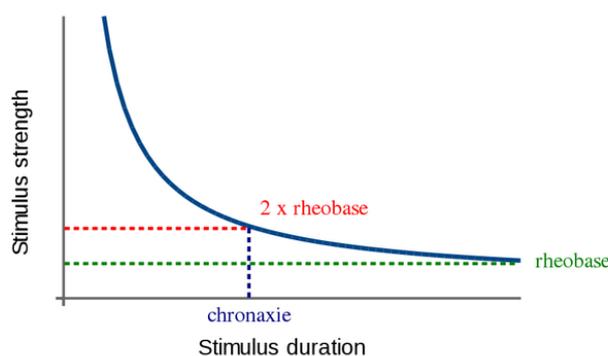


Fig. 3 : représentation graphique des points de la chronaxie et de la rhéobase en fonction du la force du stimulus et de sa durée

Pour mesurer cette variable, on emploie des impulsions rectangulaires aussi appelées impulsions à début brusque ou à front raide (Crépon, Doubrère, Vanderthommen, Castel-Kremer, Cadet, 2007). Celles-ci sont définies par une mise en place instantanée de l'intensité préalablement réglée au seuil du double de la rhéobase. A noter que cette forme d'établissement direct du courant est aussi plus tolérée par l'homme qu'une forme progressive (Crépon et al. 2007). De plus, cette méthode a comme avantage de diminuer le seuil d'excitation grâce à la mise en place instantanée du courant. Pour déterminer la valeur de la chronaxie, on augmente par la suite progressivement la durée d'impulsion jusqu'à atteindre une réponse correspondant à la chronaxie du muscle testé (Crépon et al. 2007). Chez un sujet sain ne présentant pas de lésions au niveau de l'innervation musculaire, la valeur de chronaxie se situe la plupart du temps entre 100 à 600 (us) (Crépon et al. 2007).

Dans la plupart des cas, les deux unités utilisées pour l'intensité et la durée d'impulsion sont définies en milliampères (mA) et en millisecondes (ms) ou microsecondes (μ s). Il est intéressant de signaler que l'élévation de l'un ou l'autre de ces indices au-dessus du seuil d'excitation a pour conséquence d'augmenter le nombre de fibres musculaires stimulées pouvant être excitées. Par ailleurs, le potentiel d'action résultant de ces deux paramètres peut être de l'ordre de 10 ms lorsqu'il s'agit des muscles très rapides à 100 ms pour les muscles les plus lents (Crépon et al. 2007).

2.4 Les propriétés de l'électrostimulation

Lorsqu'il est diffusé à l'aide d'un électro stimulateur, les types et les propriétés du courant peuvent être variés. Les prochains points fournissent un aperçu global des notions paramétriques en l'électrostimulation.

2.4.1 Etats et types de courants

Il existe plusieurs manières de produire un courant électrique et chaque variante possède des propriétés particulières. En général, on classifie le courant électrique selon deux domaines possédant eux-mêmes deux sous-ensembles. Crépon et al. (2007), ont rédigé un article très complet sur l'électrothérapie et l'électrostimulation. Voici la classification du courant électrique qui ressort de cette étude :

A l'état constant ou direct : « c'est le courant continu ou galvanique. Son intensité est constante. Il est toujours unidirectionnel. » (Crépon et al. 2007, p. 2).

A l'état variable ou par impulsions intermittentes: « la variation de son intensité produit des impulsions. Une impulsion est une variation de courte durée d'une grandeur physique avec retour à l'état initial. Les impulsions peuvent être unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Les courants de basse fréquence (<150Hz) et de très basse fréquence (<10Hz) produisent l'électrostimulation des tissus excitables (nerfs, muscles) et présentent des propriétés antalgiques, excitomotrices et trophiques¹⁰ d'un intérêt essentiel en rééducation fonctionnelle. » (Crépon et al. 2007, p. 2).

2.4.2 Direction du courant

Unidirectionnel ou monophasique : « il est toujours polarisé : les électrons se dirigent toujours dans le même sens, du pôle négatif (cathode) vers le pôle positif (anode). Il possède des propriétés électrolytiques aptes à produire des brûlures chimiques des tissus par formation d'acide sous l'anode et de base sous la cathode. A l'état constant, on utilise le courant continu pour le traitement de l'hyperhidrose par le bain galvanique, et avec de grandes précautions. A l'état variable, les impulsions unidirectionnelles produisent une stimulation qui prédomine sous le pôle négatif. Vu leurs dangers et leurs inconvénients, on ne les utilise que pour la stimulation du muscle dénervé. » (Crépon et al. 2007, p. 2). Voici quelques exemples de formes de courants unidirectionnels ou monophasiques : rectangulaire, triangulaire, intensité progressive (Portmann, 1991) (voir Fig. 4)

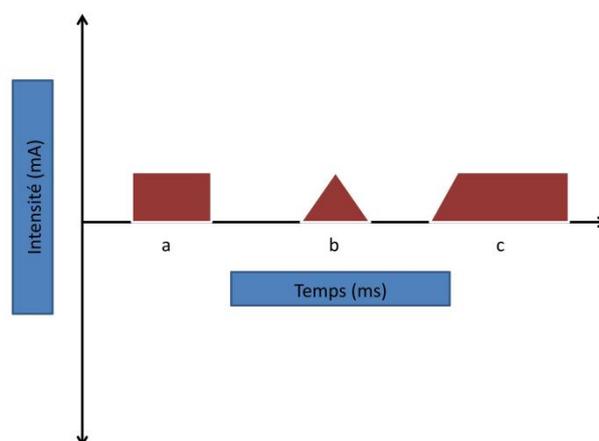


Fig. 4 : formes de courants unidirectionnels : a : rectangulaire ; b : triangulaire ; c : à intensité progressive

¹⁰ Trouble de la nutrition d'un organe, d'un tissu ou d'un organisme. Source : <http://www.med.univ-rennes1.fr/sisrai/dico/992.html>, consulté le 10 avril 2012

Bidirectionnel ou biphasique : « il est dépolarisé. Le pôle négatif et le pôle positif s'inversent à chaque impulsion. Symétrique ou asymétrique à moyenne nulle, il ne présente pas de propriétés électrolytiques, donc ne produit pas de brûlure chimique. Son protocole d'application est beaucoup plus simple : on règle l'intensité supportée par le patient et on n'est pas limité par la durée de la séance, ce qui permet d'être beaucoup plus efficace. S'il est asymétrique, les impulsions produisent une stimulation qui prédomine sous une électrode.

Vu ses qualités, ses propriétés thérapeutiques, son confort et son innocuité, on l'utilise pour la quasi-totalité des traitements d'électrostimulation antalgique et excitomotrice ». (Crépon et al. 2007, p. 2).

On répertorie deux formes de courants bidirectionnels ou biphasique : symétrique et asymétrique (Portmann, 1991). (voir Fig. 5)

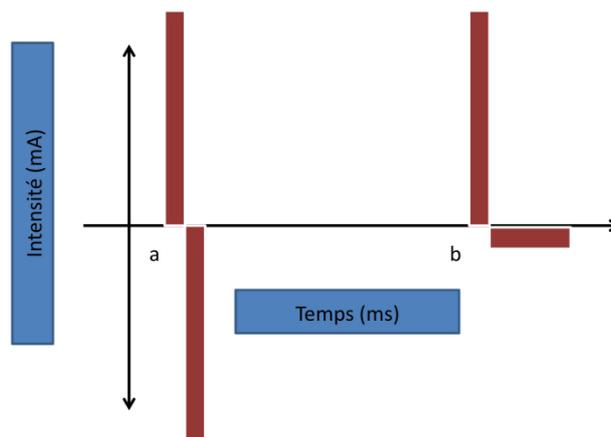


Fig. 5 : formes de courants bidirectionnels : a : symétrique ; b : asymétrique

2.4.3 Paramètres et caractéristiques des impulsions

Intensité et durée de stimulation :

Comme exposé dans les points 2.3.1 et 2.3.2, l'intensité d'une stimulation électrique est étroitement liée à sa durée de stimulation également qualifiée parfois de largeur d'impulsion. Lorsque le seuil d'excitabilité est atteint, la relation entre ces deux variables suit un rapport intangible. Si l'on diminue une durée d'impulsion, il est alors nécessaire d'augmenter son intensité pour garder une stimulation semblable (Crépon et al. 2007).

Il est aussi important de rappeler que la tolérance à l'intensité varie grandement au sein de la population et qu'il est nécessaire de ne pas négliger ce phénomène.

Pente ou durée d'établissement

Cette indication permet de savoir si le stimulus électrique choisi a subi une élévation progressive pour atteindre la valeur fixée ou si cette valeur a été produite instantanément dès le départ. On distingue donc deux types d'impulsions (Crépon et al. 2007) :

- A caractère progressive (environ 2ms)
- A caractère instantané

L'étude de Crépon et al. (2007) apporte ici aussi plusieurs informations pertinentes sur la relation de ces deux variantes :

- « si la durée d'établissement est augmentée sans augmenter l'intensité, la réponse disparaît quand on atteint la pente limite ». (Crépon et al. 2007, p. 5).
- « si on augmente la durée d'établissement, il faut augmenter l'intensité pour maintenir la réponse et la stimulation est plus désagréable ». (Crépon et al. 2007, p. 5).
- « lorsqu'un courant s'établit progressivement, il peut atteindre des intensités élevées sans provoquer d'excitation, alors que, pour ces mêmes intensités, un courant s'établissant instantanément dépasse le seuil. Le seuil d'excitation apparaît donc moins élevé lorsque le courant s'établit instantanément ». (Crépon et al. 2007, p. 5).
- « une impulsion rectangulaire dont l'intensité s'établit instantanément est également appelée impulsion à début brusque ou à front raide. Elle est plus confortable qu'une impulsion progressive puisqu'elle est aussi efficace avec une intensité inférieure ». (Crépon et al. 2007, p. 5).

En fonction de ces critères, il s'avère qu'une impulsion à caractère instantané est beaucoup plus efficace et moins gênante pour le sujet. C'est donc ce type qui est le plus couramment utilisé en électrostimulation.

Fréquence

La fréquence de stimulation correspond au nombre d'impulsions générées par seconde. L'unité utilisée pour la définir est le Herz (Hz). Elle joue un rôle prépondérant au niveau de l'amplitude de la réponse musculaire (Portmann, 1991). Si l'on utilise des basses fréquences, il ne se produit qu'une simple secousse élémentaire mais lorsque l'on applique des hautes fréquences, on assiste à un effet de téτανisation marqué du muscle. (Portmann, 1991). Ce phénomène survient lorsque la fréquence varie de 10Hz pour les fibres lentes à 65Hz pour les fibres rapides (Crépon et al. 2007). Lors d'une séance d'électrostimulation, la fréquence doit donc être choisie en fonction de l'objectif visé.

Voici une classification des fréquences ordinaires :

- Très basses : de 0 à 10Hz
- Basses : 10 à 100Hz
- Moyennes: 100 à 150Hz

Modulations

Cette fonction s'applique lorsque l'on désire varier les ajustements des différents paramètres comme l'intensité, la durée d'impulsion et la fréquence. Elle a pour but de limiter l'accoutumance du sujet au courant (Portmann, 1991). Les appareils que l'on trouve actuellement sur le marché sont généralement pourvus de séances préprogrammées et celles-ci sont modulées automatiquement. Cela se traduit la plupart du temps par une simple augmentation ou diminution des paramètres initiaux. L'intensité restant souvent un des seuls facteurs modifiables par le sujet même.

2.4.4 Choix et positionnement des électrodes

Ce paramètre est très important et crucial pour l'efficacité de l'électrostimulation. La taille, le type ainsi que le positionnement des électrodes doivent être choisis en fonction de l'objectif de stimulation. Plusieurs auteurs ont rappelé ce point à de nombreuses reprises (Lloyd et al., 1986 ; Lake, 1992 ; Lloyd et al., 1986 ; Ferguson et al., 1989 ; Selkovitz, 1989 cités par Gondin et al. 2011). La taille doit par exemple être optimale car des électrodes trop petites ont pour effet d'élever la densité de courant sur la zone et par conséquent d'accroître son inconvénient chez le patient. Au contraire, des électrodes surdimensionnées peuvent stimuler des muscles indésirables (Gondin et al. 2011).

Ziltener et Chantraine (1996), soulignent aussi que l'alignement des électrodes doit suivre la direction des fibres musculaires longitudinalement et non transversalement.

2.4.5 Paramètres optimaux et domaines d'utilisation dans le sport

Pour être utilisée de la meilleure manière, la stimulation électrique doit donc répondre à certains critères décrits précédemment. D'après Crépon et al. (2007, p. 6), le « courant d'électrostimulation doit être le plus efficace, le plus confortable et le plus sûr. Ses paramètres (début, durée, direction, fréquence) doivent lui permettre d'atteindre le seuil d'excitabilité avec le moins d'énergie possible et sans effets électrolytiques ». En ce qui concerne les champs d'application de l'électrostimulation dans le sport, ceux-ci sont nombreux et continuent de se diversifier. Les appareils sur le marché présentent toujours plus d'options spécifiques. Voici un aperçu des principales fonctions réparties d'après les deux domaines majeurs :

Force musculaire : échauffement, gainage, renforcement, endurance, force maximale, force explosive.

Récupération et traitement des douleurs : récupération active, récupération intense, relaxation musculaire, drainage, capillarisation, effets antalgiques.

2.5 Types de fibres musculaires et recrutement par électrostimulation

Le muscle squelettique strié est composé de plusieurs types de fibres musculaires. Ces différentes fibres sont recrutées en fonction du travail musculaire demandé et présentent des caractéristiques bien distinctes. Aujourd'hui, on répertorie trois sortes de fibres principales, les fibres de type I, de type II ainsi qu'un troisième type divisant les fibres de type II en deux catégories, les IIa et IIb ou IIx. La répartition de ces trois types de fibres varie considérablement en fonction des muscles chez l'homme. En moyenne, ceux-ci contiennent 50% de fibres de type I, 25% de fibres de type IIa et 25% de fibres de type IIb (Andersen, Schjerling, Saltin, 2000).

Les fibres I (rouges et lentes) :

« Elles sont riches en sarcoplasme et moins riches en myofibrilles, d'où leur forte coloration rouge. Leur métabolisme est essentiellement oxydatif ; elles sont riches en glycogène et en triglycérides, contiennent de très nombreuses mitochondries renfermant les enzymes intervenant dans le cycle de Krebs. Les unités motrices qui regroupent les fibres I ne comportent qu'un petit nombre de celles-ci. Ces fibres sont activées par l'intermédiaire d'un motoneurone α de diamètre modéré, dont la vitesse de conduction est réduite. Leur seuil d'activation est bas, de sorte qu'elles se trouvent mobilisées de façon préférentielle dans les contractions de faible niveau. La stimulation des fibres I donne une contraction lente et d'amplitude réduite. Les fibres sont peu fatigables : dans le cas de stimulation prolongée, les réponses ne sont pas modifiées avant un temps assez long. Les fibres I très résistantes à la fatigue sont par excellence celles qui permettent les exercices prolongés (course de fond, sport d'équipe...) et sont particulièrement bien développées chez les sujets pratiquant des exercices de longue durée ». (Monod, Flandrois, Vanderwalle, 2007, p. 76-77).

Les fibres II (blanches et rapides) :

« Les fibres II doivent d'abord être comparées aux fibres I. Elles contiennent plus de myofibrilles par cm^2 de section : leur sarcoplasme est moins abondant, mais le réticulum y est particulièrement développé. Les fibres II, qui contiennent autant de glycogène que

les fibres I mais sont dépourvues de triglycérides, ont un métabolisme à prédominance glycolytique : les mitochondries peu abondantes et les capillaires sanguins peu développés. Les fibres II sont organisées en unités motrices formées de motoneurone α de grand diamètre et d'un très grand nombre de fibres musculaires. Au cours de contractions d'intensité croissante, leur recrutement est précédé par celui des fibres I. Lorsqu'elles sont activées, les fibres II donnent une réponse rapide, une tension élevée, mais sont plus rapidement fatigables. Elles sont activées dans les contractions très rapides. Ainsi, les fibres II apparaissent-elles comme particulièrement adaptées aux exercices brefs et intenses (sauts, courses de vitesse, etc), et sont mises en jeu dans les activités de courte durée. » (Monod et al. 2007, p. 77-78-79).

Division des fibres de types II :

Le dernier groupe de fibres musculaires est une subdivision des fibres II en deux catégories IIa et IIx (IIb). Les fibres IIa possèdent un diamètre plus grand que les fibres I mais révèlent un potentiel oxydatif moindre. En comparaison aux fibres IIx, leur tension maximale est plus faible mais elles sont en contrepartie plus résistantes. Par conséquent, les fibres IIx sont les fibres les plus rapides et les plus puissantes mais sont difficilement recrutées (Dufour, 2009).

2.5.1 Ordre d'activation des unités motrices lors d'une contraction volontaire

Lorsque le muscle squelettique est soumis à une contraction volontaire, la réponse apportée par celui-ci ainsi que les fibres stimulées réagissent en fonction d'une logique reconnue. Selon Henneman et al. (Fig. 6 p. 18)(1965, cité par Feiereisen, Duchateau, 1997, Mendell, 2005, Vanderthommen, Duchateau, 2007) le recrutement des fibres musculaires lors d'une contraction volontaire s'effectue progressivement en fonction de leur taille et du degré du seuil d'excitabilité du motoneurone correspondant. Une activité de faible intensité privilégie le recrutement des fibres lentes de types I possédant des motoneurones de petites tailles, alors qu'un exercice musculaire de haute intensité engage le recrutement des fibres de types II, associées à de gros motoneurones (Mathieu-Thépaut, 1998).

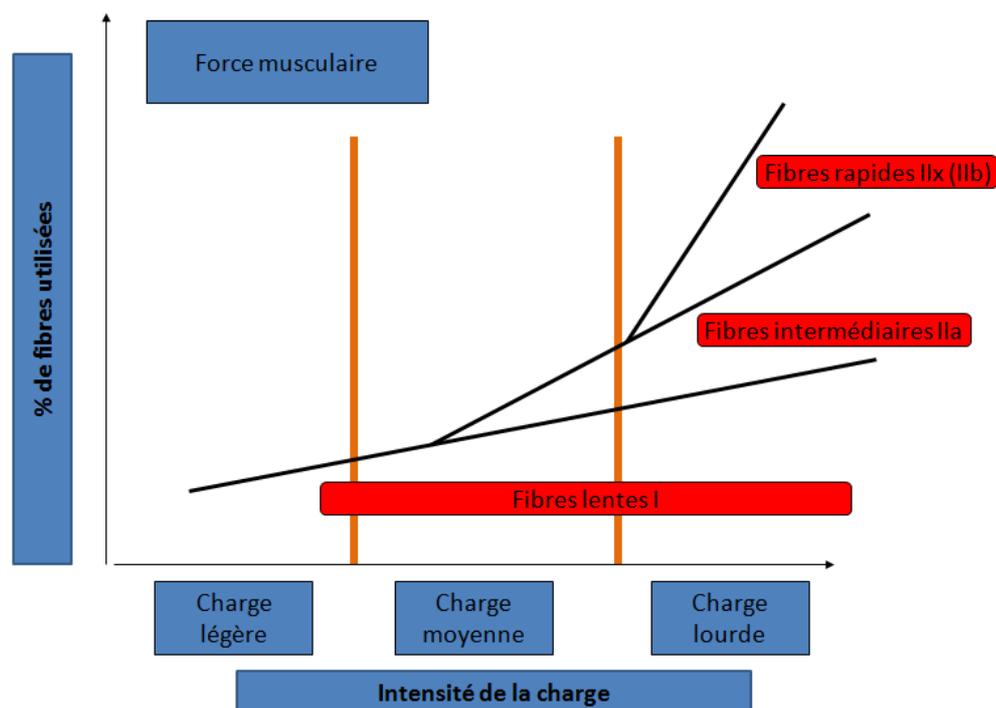


Fig. 6 : recrutement des fibres musculaires selon la loi d'Henneman, l'ordre d'activation des types de fibres est fonction de l'intensité

2.5.2 Ordre d'activation des unités motrices lors de l'électrostimulation

Le principe d'activation et du recrutement des fibres musculaires par l'électrostimulation a subi plusieurs contestations. En premier lieu, les recherches orientées sur cette problématique ont proposé que la mise en place d'un influx électrique transcutané provoquait une inversion du « principe de la taille » d'Henneman (Dehail et al. 2008 ; Gregory, Bickel, 2005). Ceci impliquait que les fibres rapides, de plus grandes tailles et possédant un seuil d'activation élevé étaient recrutées avant les fibres lentes, de petites tailles et possédant des propriétés inverses. Ce principe reposait sur deux relations (Gregory, Bickel, 2005) :

1. Les axones des motoneurones plus grands ont une plus faible résistance au courant électrique et conduisent le potentiel d'action à un seuil plus élevé que les petits motoneurones (Gregory, Bickel, 2005). Autrement dit, « ce sont les axones de gros diamètres (liés aux fibres de type II) qui sont les plus excitables » (Mathieu-Thépaut, 1998).

2. Ce processus inverse à la logique d'Henneman était aussi soutenu par les résultats qui révélèrent une fatigue accrue de la musculature par électrostimulation vis-à-vis de contractions volontaires de la même intensité (Gregory, Bickel, 2005). Les fibres II ayant une plus grande fatigabilité que celles de types I, les observateurs en concluaient qu'elles étaient par conséquent recrutées en premier.

Cette vision théorique penchait alors pour un recrutement plus aisé des fibres rapides de type II. L'apport d'une stimulation artificielle électrique avait comme avantage de rendre certaines séances d'entraînement sélectives en termes de recrutement des fibres musculaires en jouant sur les intensités et les fréquences (Mathieu-Thépaut, 1998).

Cependant, ce principe a par la suite fait l'objet d'études sélectives afin de différencier l'influence précise de plusieurs paramètres comme le degré d'excitabilité, la vitesse de conduction ou encore le degré de fatigabilité (Mathieu-Thépaut, 1998). Le paradigme actuel du recrutement des fibres musculaires par électrostimulation se situe plus dans une approche non sélective par rapport à une réponse synchrone lors de la contraction volontaire (Mathieu-Thépaut, 1998 ; Vanderthommen, Crielaard 2001 ; Gregory, Bickel, 2005 ; Dehail et al. 2008 ; Gondin et al. 2011). La cause de la fatigue accentuée des fibres musculaires par électrostimulation ne serait pas due au recrutement préférentiel des fibres de type II mais par le fait que le courant exerce son activité permanente ou intermittente sur le même groupe de fibres accentuant ainsi le phénomène d'épuisement. Lors d'une contraction volontaire de même intensité, les fibres fatiguées sont remplacées par un recrutement alternatif d'un autre groupe de fibres ou soulagées par l'activation de motoneurones additionnels (Gregory, Bickel, 2005). L'électrostimulation exerce donc un travail fixe sur les fibres musculaires stimulées sans alternatives possibles. Selon Dehail et al. (2008), cette fatigue locale et marquée sur la zone de stimulation pourrait aussi résulter d'un mauvais choix dans le placement, la taille, la surface ainsi que du type d'électrodes. Ces facteurs « non physiologiques » joueraient ainsi un rôle décisif sur le patron de recrutement.

Dans le même contexte, Gondin et al. (2011) ajoute que les propriétés neuromusculaires intrinsèques de chaque individu comme l'organisation des branches axonales favorisent

et impliquent une grande hétérogénéité interindividuelle. Cette déclaration peut aussi être mise en relation avec le résultat d'une étude menée en médecine du sport par Vanderthommen et Crielaard en 2001. Dans cette publication, les auteurs indiquent que le recrutement préférentiel des fibres musculaires est fortement lié à la distance qui sépare l'électrode du muscle. L'activation particulière des fibres musculaires durant l'électrostimulation est donc aussi en rapport avec la densité du courant électrique sur la zone stimulée : plus la distance entre les branches axonales et l'électrode augmente, plus l'effet du courant électrique sur les fibres musculaires diminue. Ces propos avaient déjà été proposés par l'étude de Mathieu-Thépaut (1998) sur le recrutement différentiel des unités motrices par électrostimulation. Ces deux auteurs ajoutent aussi qu'il faut prendre en considération le type de muscle étudié puisqu'il existe des disparités marquées dans la constitution fibreuse intermusculaire.

2.6 Fatigue et récupération musculaire

Avant de clore cette partie introductive par les bases scientifiques actuelles de la récupération par électrostimulation, il semble judicieux de définir deux notions faisant partie intégrante de cette thématique, la fatigue et la régénération musculaire. Les prochains points décrivent ainsi les principales propriétés de ces deux réponses physiologiques et permettent de mieux comprendre les différents stades et processus qui s'y retrouvent.

2.6.1 L'effort et la fatigue musculaire

La fatigue musculaire est certainement le facteur ayant le plus d'incidence sur la performance sportive. Elle est généralement définie comme la réduction de performances physiques ou mentales. Lorsqu'elle fait son apparition, l'athlète est contraint sous l'effet de plusieurs réactions physiologiques et cognitives de diminuer son effort ou dans les cas les plus extrêmes, de le stopper. Cette conséquence liée à un travail musculaire provient d'une défaillance dans la chaîne du processus (voir Fig. 7 p. 21) de la contraction musculaire allant de la motivation, à la formation des ponts d'actine-myosine générant la force. La résultante de ce phénomène étant une diminution de la force maximale ainsi qu'un ralentissement de la réponse contractile (Sesboüé, Guincestre, 2006).

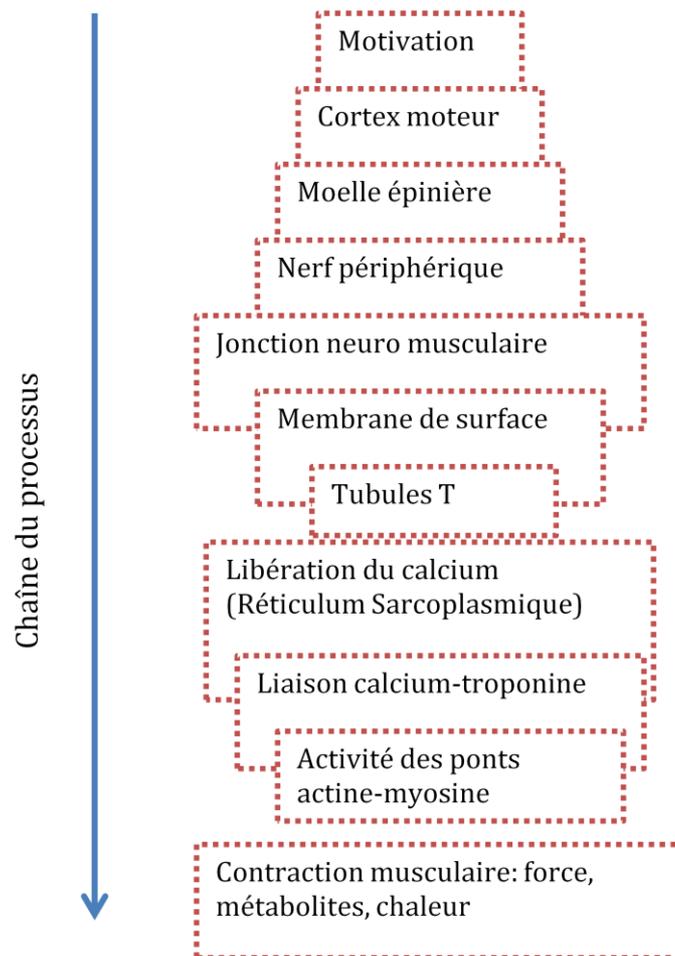


Fig. 7 : chaîne de commande de la contraction musculaire, la fatigue peut survenir en n'importe quel point de la chaîne (Sesboué, Guincestre, 2006, p. 259)

La fatigue constitue donc un élément central du système physiologique du corps humain, surtout lorsque celui-ci est soumis à un effort physique ou cognitif. Parallèlement, on distingue deux types de fatigue : la fatigue centrale et la fatigue périphérique. La première fait référence aux différents facteurs pouvant altérer le fonctionnement musculaire optimal tout en excluant les qualités de contractions musculaires intrinsèques et métaboliques du muscle ou du groupe musculaire stimulé (Sesboüé, Guincestre, 2006). Cette première filière se résume par une fatigue nerveuse et non musculaire au sens propre et celle-ci provient d'une défaillance le long du trajet de l'influx nerveux se propageant des voies corticales jusqu'à la plaque motrice (Sesboüé, Guincestre, 2006)(voir Fig. 7).

La fatigue périphérique, quant à elle, agit sur les structures de la fibre musculaire et réduit les capacités de contractions musculaires. Cette déficience temporaire provient principalement d'une accumulation de substrats et de métabolites comme le lactate allié à une baisse de pH (Sesboüé, Guincestre, 2006). Cependant, les dispositifs de ce phénomène sont tellement complexes qu'il n'est pas encore possible de les comprendre en tout point. De ce fait, cette thématique continue de soulever un fort intérêt scientifique, désireux de découvrir de nouvelles explications à cette réaction physiologique.

2.6.2 Le principe de la récupération

Après avoir été soumises à un effort, les différentes structures constituantes de la musculature ont donc besoin d'une phase de repos pour pouvoir se régénérer et rééditer la performance atteinte auparavant. Cette phase de régénération peut s'étendre de quelques secondes à plusieurs jours en fonction du type et de l'intensité de l'effort fourni (Martin et al. cités par Babault et al. 2011). A noter que les exercices de types excentriques intenses et/ou inhabituels sont ceux qui procurent les durées de régénération les plus longues à cause des micros-lésions musculaires qu'ils engendrent (Coudreuse, Dupont, Nicol, 2004 ; Sesboüé, Guincestre, 2006).

Selon une étude menée en 2008 par Bishop, Jones et Woods, on peut distinguer trois types de récupération :

La récupération immédiate qui correspond à celle qui se produit au sein même du mouvement. Les auteurs donnent comme exemple le fait de marcher, durant cet exercice, il y a une régénération du membre inférieur le plus bas entre chaque foulée. Comme chaque jambe récupère plus rapidement, le marcheur pourra effectuer la tâche d'une foulée plus efficacement.

La récupération à court-terme désigne celle qui a lieu entre des séries ou lors d'un exercice par intervalles. C'est la forme de récupération la plus commune dans l'entraînement (Seiler, 2005 cité par Bishop et al. 2008).

La récupération à l'entraînement constitue la dernière variante et définit le temps de récupération entre des sessions d'entraînement ou des compétitions.

Tout au long de cette phase régénérative variable, les capacités de performance d'un athlète se situent donc en dessous de ses capacités maximales. Cette période est d'autant plus pénalisante lorsque le sportif est amené à fournir des efforts intenses à plusieurs reprises et ceci dans une période courte. Un bon dosage entre charge et récupération est donc indispensable pour arriver à retrouver ses capacités de performance musculaire.

Pour y parvenir, une multitude de dispositifs et de techniques ont vu le jour dans l'histoire du sport contemporain. En comparaison à une récupération passive synonyme d'inactivité sportive, ces modalités auraient la capacité d'augmenter le potentiel de régénération musculaire (Babault et al. 2011). L'électrostimulation fait partie de ces procédés et occupe une place souvent privilégiée au sein des disciplines sportives individuelles et collectives où l'endurance joue un rôle prépondérant (Babault et al. 2011).

2.7 L'électrostimulation et la régénération musculaire

Selon certaines croyances empiriques, le fait d'appliquer de courtes stimulations électriques à basses fréquences et à faibles intensités sur un groupe musculaire, serait comparable à une méthode de récupération dite active ou semblable à un léger footing par exemple (Babault et al. 2011). Les zones stimulées bénéficieraient de plusieurs effets positifs sur la régénération ainsi que sur la perception de la douleur provoquée par les courbatures post-effort. Par conséquent le temps de récupération serait raccourci et l'athlète pourrait retrouver tous ses moyens plus vite. Au fil du temps, les entraîneurs et les entreprises spécialisées dans le domaine ont dressé une liste de bienfaits procurés par l'électrostimulation spécifiquement pour la récupération. Voici les deux principales conséquences positives qui seraient, selon eux, à l'origine d'une régénération améliorée :

Un débit sanguin augmenté, ce qui permettrait d'accélérer l'élimination des déchets métaboliques (lactate, ions hydrogène) produits durant l'effort et par conséquent de réduire le temps de récupération.

Une réduction des symptômes de courbatures de longue durée, provoquée par un effet antalgique sur les zones stimulées. Les éventuelles douleurs engendrées par les courbatures pourraient donc disparaître sur les régions stimulées.

2.7.1 Etats des travaux préliminaires et connaissances actuelles

A ce jour, les recherches scientifiques sur cette thématique n'ont pas révélé des résultats significatifs hormis quelques exceptions ainsi qu'un certain nombre d'indications ou d'hypothèses favorables. Que cela soit pour l'amélioration du potentiel régénératif des variables physiologiques, du maintien de la performance athlétique ou de la réduction de la douleur subjective due aux courbatures, l'utilisation de l'électrostimulation ne semble pas altérer le fonctionnement physiologique régénératif musculaire général de l'être humain (Babault et al. 2011). Néanmoins, tout en gardant un scepticisme marqué, la littérature révèle aussi de multiples controverses.

Les différents auteurs qui se sont penchés sur ce sujet ont tenté d'évaluer plusieurs types de stimulations en variant le paramétrage de l'émission du courant ainsi que les formes de fatigue exercées sur les sujets d'études. Il y a vingt ans, Denegar et Perrin (1992) ont lancé les investigations en étudiant la répercussion de l'électrostimulation, du froid et la combinaison d'un traitement contre la douleur pour lutter contre la diminution de la mobilité articulaire et la perte de force provoquée et associée aux courbatures. Leurs principaux résultats ont indiqué que le froid, l'électrostimulation et la combinaison des deux semblent avoir eu dans leur cas, un effet analgésique significatif contre les courbatures et sur leur perception.

En 2008, Tessitore, Meeusen, Pagano, Bienvenuti, Tiberi et Capranica ont évalué l'efficacité de stratégies de récupération actives et passives après un match de futsal. Le résultat principal de cette étude a prouvé qu'aucune méthode de récupération n'a permis de révéler une différence significative en termes physiologiques. Toutefois, l'analyse statistique d'un questionnaire portant sur les préférences des sujets envers les méthodes de récupération a démontré que ceux-ci percevaient plus de bénéfices à travers l'électrostimulation ($p < 0.01$).

Les auteurs ont conclu que la plupart des résultats négatifs trouvés à travers cette étude pouvaient être aussi dus à trois limitations majeures. D'une part, les résultats statistiques ont certainement été altérés car les groupes de la population d'étude étaient

petits et trop sélectifs. Néanmoins ces résultats restent analogues à ceux d'une étude précédente (Tessitore, Meeusen, Cortis Capranica, 2007 cités par Tessitore et al. 2008). Le deuxième facteur limitant se rattache aux propriétés anthropométriques des sujets de l'étude, il est possible que le jeune âge des participants, leur excellente condition physique ainsi que leur hygiène de vie irréprochable aient eu plus d'impact sur la récupération que les méthodes mises en œuvres. Enfin, la troisième limite de cette étude tient du fait que la période d'évaluation a été fixée à deux semaines, ce qui semble être trop court pour évaluer l'indice de récupération à long terme. Les auteurs concluent que cette étude a permis de révéler des indications importantes pour le futsal et pour les sports collectifs en général, notamment sur l'importance de l'hydratation et du sommeil. En ce qui concerne la thématique de la récupération au sens propre, ils portent un accent particulier sur le fait que l'utilisation d'une technique de récupération adéquate et appréciée peut être favorable envers l'attitude des athlètes sur les entraînements et les compétitions.

Une autre étude menée par Heyman, De Geus, Mertens et Meeusen en 2008 apporte des résultats pratiquement identiques. Dans leur recherche, ces auteurs ont tenté de différencier les effets de quatre méthodes de récupération (passive, active sur vélo ergométrique, immersion en eau froide, électrostimulation) sur la performance maximale en grimpe. Les résultats n'ont pas révélé de différences significatives en ce qui concerne l'électrostimulation et la récupération passive. En contrepartie, des résultats positifs ont été trouvés pour l'immersion en eau froide et la récupération active sur bicyclette ergométrique ($p < 0.01$). Il semblerait que ces deux méthodes aient une influence sur le recyclage du lactate et que l'immersion en eau froide au niveau des bras ait un effet sur des performances maximales répétées. Les auteurs ont attribué cet effet positif à la sensation de douleur certainement atténuée ainsi qu'à une diminution de la rigidité musculaire sur les avant-bras. Ces bénéfices étant le résultat de l'effet antalgique du froid sur la perception de la douleur et de ses propriétés anti-inflammatoires via une réduction de la perméabilité des vaisseaux sanguins.

S'agissant du temps de recyclage du lactate, deux publications parues entre 2009 et 2011 contredisent les propos de Heyman et al. (2008) en rapportant des résultats significatifs. Neric, Beam, Brown, Wiersma (2009), en comparant une stratégie de recyclage du lactate par électrostimulation à une stratégie passive chez des nageurs sprinteurs, ont en effet conclu que l'électrostimulation pouvait s'avérer propice pour ce

domaine. Cette proposition a été d'ailleurs confirmée par Warren, Brown, Landers et Stahura (2011) qui ont pour leur part évalué cet indice de récupération auprès de joueurs de baseball. De plus, comme pour l'étude de Tessitore et al. (2008), cette modalité de récupération a été la plus appréciée au sein des athlètes et ceux-ci ont l'impression d'avoir davantage récupéré. Dans le même laps de temps, Vanderthommen et al. ont comparé en 2010 l'utilisation d'une technique de récupération par électrostimulation à une technique de récupération active après un effort isométrique sous-maximal en se basant sur les résultats d'une étude antérieure (Cramp, Gilsenan, Lowe, Walsh, 2000 cités par Vanderthommen et al. 2010). L'étude n'a pas présenté de différences significatives entre les modalités testées sur le plan physiologique ou perceptif de la douleur. D'autres investigations sont à leur avis nécessaires pour mieux discerner d'éventuelles différences. Dans leur conclusion, les auteurs insistent aussi sur le besoin d'appliquer ces méthodes sur des exercices plus spécifiques comme des sauts par exemple afin de mieux reproduire les conditions pratiques de la discipline.

En réponse à cette étude, Malone, Coughlan, Crowe, Gissane et Caulfield (2011) ont effectué une recherche avec, comme sujets, des triathlètes. Dans cette étude, il a été question de connaître les effets physiologiques causés par une électrostimulation de basse intensité sur la récupération à court-terme pour des exercices supra-maximaux. Les paramètres de l'appareil de stimulation électrique (intensité sous tétanique et intermittente) ont été choisis pour créer une activité musculaire capable d'augmenter le niveau de flux sanguin tout en minimisant les risques de fatigue que pourrait procurer l'électrostimulation. Les résultats n'ont pas rapporté de nouveaux arguments favorables du point de vue physiologique. L'électrostimulation n'a pas montré un meilleur recyclage du lactate par rapport aux méthodes passives et actives en termes de récupération à court-terme. La récupération active possède les meilleurs résultats pour ce qui est du recyclage du lactate dans cette recherche. Cependant, les auteurs de cette étude stipulent que l'électrostimulation ne paraît pas avoir moins d'effets que les méthodes traditionnelles et que celle-ci pourrait même être avantageuse dans certains cas, spécialement lorsqu'il n'est pas possible d'effectuer une récupération active. Dans certaines situations comme celle-ci, il serait préférable d'initier des contractions musculaires involontaires par électrostimulation afin d'augmenter le débit sanguin qui, s'il ne se réfère pas directement à une augmentation de performance, peut temporairement soulager l'athlète de ses courbatures. De plus, ceci pourrait aussi l'aider

à se sentir mieux ou dans une perspective sécuritaire, réduire la possibilité de voir apparaître une réaction musculaire négative après un exercice supra-maximal (Malone et al. 2011).

Après avoir pris connaissances des avis divergents de la littérature, il semble que le potentiel de l'électrostimulation vis-à-vis de la récupération a tendance à être très hétérogène et considéré comme mesure complémentaire. Cependant, comme vu précédemment, certaines publications ont aussi permis de mettre en avant des points positifs notamment sur la perception de la douleur ou dans certains cas sur l'élimination de métabolites. En outre, malgré des résultats globaux décevants, ce domaine continue d'intriguer une partie de la communauté scientifique en physiologie du sport. Dans leur article à caractère synthétique, Babault et al. (2011) mettent aussi en avant le fait que la grande variabilité méthodologique et que le choix arbitraire des paramétrages de stimulation peuvent aussi avoir joué un rôle important face à l'absence de réels effets positifs. Certes sur le plan purement énergétique et de la performance, l'électrostimulation manque clairement d'avis formels mais comme indiqué par Tessitore et al. (2008) cette technique est souvent appréciée et peut donc subvenir à l'athlète en lui attribuant un meilleur bien-être post-effort. De plus, selon Babault et al. (2011), l'électrostimulation apparaît être une alternative valide au traitement post-exercice, lorsque les courbatures sont la raison principale de l'impossibilité de reprendre tout autre forme active.

2.8 Littérature et objectifs de l'étude

En se basant sur les indications et les conclusions de toutes les études présentées précédemment et par rapport aux moyens disponibles pour ce travail de master, il a été retenu, comme cité dans le point 1.2, d'évaluer le potentiel de régénération musculaire à court-terme par électrostimulation suite à une séance d'endurance d'intensité moyenne. Pour ce faire, deux composantes ont été choisies : une première d'ordre physiologique (qualités contractiles) mesurée lors de sauts pliométriques et une seconde perceptive jugée sous forme de questionnaire soumis aux sujets. La présentation détaillée des formes d'évaluations, du matériel utilisé, de la planification ainsi que la population d'étude est décrite dans le chapitre suivant.

3 Méthodologie

3.1 Population de l'étude

Pour cette recherche, 20 étudiants de sexe masculin de la filière « Sciences du Mouvement et du Sport » de l'Université de Fribourg ont été retenus et répartis dans deux groupes (2x n=10). Le premier groupe a été qualifié de groupe de contrôle (C) et le second de groupe expérimental (E). Voici leurs caractéristiques respectives :

Groupe C : âge (M= 26.3 ± 2.5 ans), taille (M= 177.8 ± 4.7cm), poids (M= 71.9 ± 8.2 kg)

Groupe E : âge (M= 25.6 ± 1.9 ans), taille (M= 179.3 ± 8.5cm), poids (M= 72.4 ± 9.1 kg)

3.2 Critères de qualité

Afin de satisfaire à des critères de qualité, plusieurs conditions ont été déterminées et tous les participants étaient censés les respecter pour pouvoir être inclus dans les deux groupes (C et E). Pour vérifier ces conditions, les sujets ont rempli le questionnaire officiel¹¹ du protocole de test du Swiss Olympic Medical Center. Ce document permet d'avoir une vision détaillée de l'état de santé du sujet ainsi que de ses dispositions physiologiques et émotionnelles du moment. Voici les points ainsi que les valeurs qui étaient demandés aux participants pour être acceptés :

- Pas d'entraînement de grand volume ou d'intensité haute dans les dernières 48h
- Aucune maladie ou virus à signaler dans les derniers 14 jours
- Aucune douleur ou gêne musculaire à signaler le jour des tests
- Niveau de motivation minimal avant le début de l'évaluation (minimum 5 sur 10 sur l'échelle du questionnaire de Swiss Olympic)

Limite dans les critères de qualité :

Les participants ayant souvent un emploi du temps chargé et certains d'entre eux pouvant être considérés comme sportifs d'élites, il n'a pas toujours été possible de réunir toutes les conditions préalablement citées. De ce fait, 4 participants (2x groupe C et 2x groupe E) ne respectaient pas la première condition. Néanmoins, ils ne

¹¹ Cf. annexe 1

présentaient aucun signe de fatigue musculaire accrue et n'ont pas révélé ressentir des courbatures au niveau des membres inférieurs et supérieurs. Ces 4 sujets, étant répartis de manière équilibrée dans les deux groupes, n'ont pas été exclus de cette étude.

3.3 Protocole de test

Tab. 1 : aperçu des étapes d'évaluation ainsi que du contenu d'une séance de test

Protocole de test		
Planification	Informations	Quand ?
1 ^{re} étape	Test de VMA pour tous les sujets	Individuel
Inscription et convocation aux séances de tests dans le laboratoire du département des sports de l'Université de Fribourg du Fitness de Pérolles II		
2 ^e étape Séance de test en laboratoire Suite chronologique	1	Convocation au test de laboratoire par 1 ou par 2. Si 2 : 1 sujet groupe C et un sujet groupe E
	2	Test de sauts avec Myotest Pro pour C et E 10x Countermovement Jump et 20x sauts réactifs
		2 min échauffement sur tapis roulant
	3	Charge aérobie sur tapis roulant à 75% de VMA durant 20 min pour C et E
		3 min de pause → installation des sujets des deux groupes C et E pour la séance de récupération
	4	Séance avec électrostimulateur Compex 24' pour le sujet E/ Utilisation de la fonction « récupération active » Sujet C inactif « récupération passive »
	5	2 min après la séance de récupération Test Myocheck initial pour C et E
	6	10 min de pause inactive pour C et E
	7	Dernier test Myocheck initial pour C et E
	8	Clotûre du test et remerciements

Inscription des participants aux heures proposées

Possibilité de venir seul ou à deux maximum

A leur arrivée à la séance de test en laboratoire, tous les participants (groupe C et E) ont reçu une feuille¹² protocolaire contenant les différentes étapes de la séance du test. Ceci a permis de suivre un déroulement méthodique et un respect du temps à disposition entre et pour chaque test.

Les prochains points sont consacrés à la description détaillée des types d'évaluations ainsi qu'aux appareils utilisés pour cette recherche.

3.3.1 Test de VMA

Dans un premier temps, tous les participants se sont astreints à un test de Cooper (12min) sur piste de 400m au stage St-léonard de la ville de Fribourg afin de calculer leur indice de vitesse moyenne aérobie (VMA). Après plusieurs soucis d'organisation et de nombreux désistements de la part des sujets, il n'a pas été possible de convenir d'une date précise pour que tout le monde soit présent. Après réflexion et du fait que les participants sont tous des étudiants en sport diplômés ayant déjà eu l'occasion de faire ce test, il a été convenu qu'ils pouvaient réaliser ce test individuellement et rapporter leur valeur lors de leur séance de test en laboratoire.

La valeur transmise étant une distance en mètres (m), il a fallu par la suite la transposer à l'aide de la formule d'Howald (1974) ci-contre :

$$VO2max \left(\frac{\text{kilomètres (km)}}{\text{heure (h)}} \right) = \frac{22.351 \times \text{distance parcourue en km en 12 minutes (min)} - 11.288}{3.5}$$

Fig. 8 : formule utilisée pour calculer les indices de VMA en km/h

Limites de cette variante :

Dans un premier temps, il avait été convenu d'utiliser la méthode VAMEVAL qui permet de mesurer l'indice de VMA directement en km/h ainsi que celui de la fréquence cardiaque maximale en pulsation par minutes. Malheureusement, la mise en place d'une séance commune pour tous les sujets de l'étude en plus de leur convocation en laboratoire n'a pas été possible du fait de l'investissement conséquent en temps

¹² Cf. annexe 2

demandé. Néanmoins, les valeurs extrapolées par la formule sont proches des valeurs VAMEVAL que certains sujets, qui s'adonnent régulièrement à la course à pied, ont déjà obtenues. Les moyennes des valeurs des deux groupes (C) et (E) sont aussi proches (voir Tab. 2), ce qui renforce l'homogénéité de la population de l'étude.

Tab. 2 : présentation des valeurs de VMA à 75% en km/h pour les groupes C et E

Groupe de contrôle (C)		Groupe expérimental (E)	
Sujets	Indice de VMA (75%)	Sujets	Indice de VMA (75%)
N1	12.0	N1	11.9
N2	12.5	N2	11.8
N3	12.2	N3	12.1
N4	14.0	N4	14.0
N5	12.2	N5	13.3
N6	12.0	N6	15.7
N7	12.4	N7	12.5
N8	11.7	N8	12.5
N9	13.8	N9	12.2
N10	12.3	N10	12.5
Moyenne =	12.51 ± 0.76	Moyenne =	12.81 ± 1.24

3.3.2 Test d'endurance sur tapis roulant

Pour parvenir à créer une fatigue musculaire suffisante chez les sujets (groupe C et E), ceux-ci ont couru à une vitesse constante pendant 20 minutes (75 % de leur VMA en km/h) sur un tapis roulant dont l'inclinaison était nulle (0°). Cette forme d'exercice a été choisie en fonction de deux modèles. La durée de la séance d'endurance peut être qualifiée d'après la classification (en fonction de la durée) de Pfeifer et Harre (1982) comme une endurance en aérobie I de moyenne durée I (entre 10min et 30min). Voici un aperçu des types d'endurance proposés par le modèle mis au point par ces deux auteurs :

Endurance courte	35 s - 2 min
Endurance moyenne	2 - 10 min
Endurance longue I	10 - 35 min
Endurance longue II	35 - 90 min
Endurance longue III	90 min - 6h
Endurance longue IV	au-delà de 6h

L'intensité de course a été définie d'après le modèle de Millet (2006) selon lequel le maintien d'une fraction de VO_{2max} est le plus souvent associé à la notion d'endurance. Les auteurs considèrent ici l'endurance comme la capacité de maintenir longtemps une vitesse relative élevée. Cependant, la diminution du pourcentage de VO_{2max} est très différente selon les athlètes (voir ci-contre).

Tab. 3 : fraction de VO_{2max} maintenue en compétition sur des durées différentes par des coureurs dont l'endurance est plus ou moins élevée (Millet, 2006, p. 19)

	Intensité maintenue (en % de VO_{2max})		
	Endurance		
Durée	Faible	Moyenne	Forte
7 min	100	100	100
30 min	87	89	92
90 min	76	80	87
180 min	70	75	83

Etant donné que les sujets de l'étude ne sont pas tous des spécialistes en endurance et pour garantir qu'ils puissent garder leur cadence tout au long de la séance de 20 minutes, l'intensité a été fixée à 75 % de la VO_{2max} . Par ailleurs, personne n'a été contraint de diminuer sa vitesse ou de stopper temporairement son effort pour cause de fatigue ou de malaise. La vitesse débutant directement à une allure soutenue, chaque sujet a pu s'échauffer pendant 2 minutes à une vitesse de 8.5 km/h avant de débiter les 20 minutes effectives.

3.3.3 Tests de sauts avec le « Myotest Pro »

Avant d'exposer en détails le protocole des tests de sauts, il est nécessaire de brièvement présenter l'appareil qui a été utilisé pour cette partie de l'étude, le Myotest Pro (voir Fig. 9).

La société Suisse Myotest SA, créée en 2004 à Sion par Patrick Flaction a comme objectif de fournir aux sportifs d'élites, comme aux amateurs, des appareils capables de mesurer de manière simple, rapide et efficace, leur performance. L'outil principal de cette gamme de produits repose sur un petit boîtier orange de 40 grammes semblable à un baladeur mp3 contenant un accéléromètre triaxial¹³, permettant de mesurer plusieurs variables liées à la performance musculaire.

Le Myotest Pro a été conçu pour répondre aux besoins des professionnels du sport (entraîneurs, préparateurs physiques, médecins du sport et kinésithérapeutes). Développé par des préparateurs physiques, il fournit un ensemble de tests préprogrammés ainsi qu'un test libre pour mesurer des mouvements spécifiques. De plus, cet appareil est pourvu d'un logiciel d'analyse permettant de décomposer, d'illustrer (graphiques, histogrammes), de comparer et de partager chaque mouvement sportif.

L'utilisation du Myotest Pro est simple et à la portée de tous, ce qui lui vaut d'être apprécié dans de nombreuses disciplines. L'appareil peut être fixé sur un objet (barre, poids) ou directement sur le sujet au niveau des hanches précisément entre le grand trochanter et la crête iliaque. Le boîtier est maintenu grâce à une ceinture velcro (voir flèche rouge, Fig. 10).



Fig. 9 : Myotest Pro et accessoires

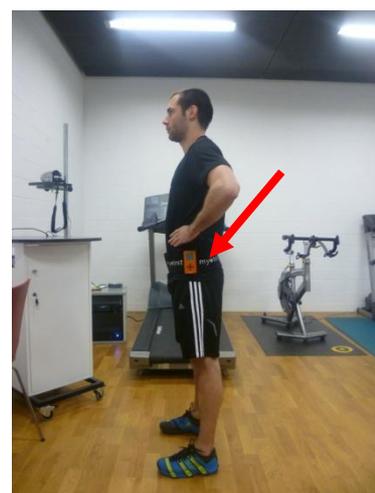


Fig. 10 : Myotest Pro positionné sur un sujet

¹³ Capteur pouvant mesurer l'accélération en étant basé sur les lois fondamentales de la dynamique : $F=M*A$ (F=force : M=Masse : A : accélération en m/s^2).

Palette des tests et variables mesurées par le Myotest Pro

Le Myotest Pro offre 9 fonctions de test :

- Développé couché
- Demi-squat
- **Saut réactivité**
- **Saut détente Counter movement jumps (CMJ)**
- Saut puissance Squat jump (SJ)
- Profil en développé couché
- Profil en demi-squat
- Entraîneur
- Runcheck

Pour ne pas s'étendre longuement sur la description de chaque test, seuls ceux choisis pour cette recherche vont être décrits (en rouge dans la liste), les informations reprennent celles du manuel¹⁴ fourni avec l'appareil :

3.3.4 Sauts de réactivité (pliométrie¹⁵)

Objectifs du test : mesurer les qualités contractiles des muscles des jambes, la réactivité et les qualités de coordination intermusculaires des membres inférieurs. En résumé, ces valeurs informent sur les qualités du rebond qui influencent la performance des impulsions appliquées au sol.

Exécution : 20 répétitions en cherchant la hauteur maximale et un temps de contact au sol minimal.

Déroulement : départ debout, mains sur les hanches, le regard droit devant en restant immobile. Lorsqu'un bip retentit, faire un saut d'élan, puis rebondir 20 fois le plus haut possible avec un temps de contact le plus court possible, en gardant les mains au contact de la taille (sauter sur la plante de pieds avec flexion minimale des genoux, comme sur un trampoline voir Fig. 11). Après 20 rebonds, le double bip signale la fin du test.



Fig. 11 : aperçu d'un mouvement de saut réactif

¹⁴ Guide Quick Start Myotest Pro. Consulté le 12 juillet 2012. Disponible sur : http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf

¹⁵ Selon les concepteurs du Myotest Pro, ce régime de contraction pliométrique est également celui de la charge imposée aux sujets pour la course à pied.

Variables mesurées :

- **Hauteur** en cm, calculée à partir du temps de vol en ms
- **Temps de contact avec le sol** en ms
- **Indice de réactivité** : calculé d'après l'équation suivante :

$$\frac{\text{Temps de vol en ms}}{\text{Temps de contact avec le sol en ms}}$$

La dernière variable mesurée est un peu plus complexe, c'est **la stiffness**. Elle se définit comme la capacité musculo-tendineuse à résister à la déformation ou plus simplement comme la raideur musculaire. Cette variable résulte du rapport entre la contrainte imposée et la déformation obtenue. Voici sa représentation sous forme d'équation¹⁶ :

$$K_{vert} = \frac{F_{max}}{\Delta\delta}$$

Kvert (indice de stiffness)= raideur musculaire en kN/m

Fmax = force verticale maximale enregistrée lors du contact au sol exprimée en N

$\Delta\delta$ = déplacement vertical vers le bas du centre de gravité durant la phase de freinage exprimé en m

Résultats :

Ils sont directement affichés automatiquement à l'écran de l'appareil (voir exemple Fig. 12) après le test. Ils sont composés de la moyenne des 10 meilleures répétitions (référence à la hauteur). De petites flèches indiquent l'évolution par rapport à la moyenne du dernier test.

Vos résultats	
Hauteur	27.42 cm ▼
T. contact	148 ms ▼
Réactivité	3.198 ▼
Stiffness	42.35 kN/m ▼

Fig. 12 : exemple de résultats de test de réactivité

¹⁶ Divert, C. (2005). *Thèse de doctorat : Influence du chaussage sur les caractéristiques mécaniques et le coût énergétique de la course à pied*. Université de Saint-Etienne, p.40.

3.3.5 Sauts de détente (CMJ)

Objectifs du test : mesurer la hauteur de saut, la force de poussée et la vitesse

Exécution : 10 répétitions en cherchant la hauteur maximale

Déroulement : départ debout, mains sur les hanches, regard droit devant en restant immobile. Au bip court, faire un mouvement d'élan libre (flexion des genoux) et sauter le plus haut possible, en gardant les mains au contact de la taille (voir Fig. 13). La réception se fait de manière souple et amortie. Après réception, revenir en position debout et attendre immobile le prochain bip pour répéter le saut. Suite à la 10^e répétition, le double bip signale la fin du test.



Fig. 13 : aperçu d'un mouvement de saut counter movement jump

Variables mesurées :

- **Hauteur** en cm calculée à partir du temps de vol en ms
- **Force** résultant de l'équation suivante :

$$Force (F) = m * a$$

F = force en N/kg

m = masse en kg

a = accélération en m/s^2

- **Vitesse** en cm/s est égale à l'intégrale de l'accélération
- **Puissance** en W/kg, elle est la résultante du produit de la force ($m*a$) multipliée par la vitesse en cm/s

Résultats :

Comme pour le test de réactivité, les résultats sont affichés sur l'écran (voir Fig. 14) du Myotest Pro directement après le test. Ils sont composés de la moyenne des 5 meilleures répétitions (référence à la hauteur). De petites flèches indiquent également l'évolution par rapport à la moyenne du dernier test.

Remarque : le concepteur avertit l'utilisateur sur l'interprétation des résultats. L'élan étant libre durant l'exercice, une modification du chemin de flexion-extension peut influencer considérablement les valeurs de puissance et de force s'il n'est pas contrôlé par un spécialiste. Lors des tests, l'examineur présent a toujours veillé à une flexion moyenne pour limiter cet effet. Néanmoins, ce critère a été pris en considération dans l'analyse des résultats.

Vos résultats	
Hauteur	39.1 cm ▼
Puissance	62.81 W/kg ▼
Force	30.23 N/kg ▼
Vitesse	276 cm/s ▼

Fig. 14 : exemple de résultats de test de détente

3.3.6 Protocole et préparation aux tests de sauts

Mesures anthropométriques :

La taille et le poids de chaque participant ont été mesurés le jour de leur passage aux tests afin de configurer l'appareil Myotest Pro. Ces réglages ont été gardés tout au long de la séance de test.

Echauffement :

Afin d'éviter toute blessure, un échauffement de 5 min était autorisé avant les séances de test. Les participants avaient comme consigne de se limiter à des exercices ne provoquant pas de fatigue accrue sur les membres inférieurs.

Séance de test :

Pour que chaque participant puisse prendre connaissance du déroulement des tests de sauts et de la technique à adopter, voici la préparation que chacun à pu suivre :

- Explications des points clés par l'examineur présent dans le laboratoire

- Visionnage des vidéos introductives dédiées au saut de réactivité et au counter movement jump sur le site internet¹⁷ de la société Myotest SA.
- Essai de 3 répétitions pour chaque variante et feedback de l'examineur

Lors des tests de sauts, une pause de 3min a été observée entre les deux variantes (sauts de réactivités et counter movement jumps) pour permettre au sujet de récupérer et d'être à nouveau apte à fournir 100% de ses capacités.

3.3.7 Séance d'électrostimulation avec le « Compex Runner »

Comme pour le Myotest Pro, il est indispensable de présenter la société Compex Médical SA. Cette marque d'origine suisse forge son expertise dans le domaine de la rééducation, du traitement de la douleur et de l'entraînement sportif depuis plus de 20 ans. Cette société s'est notamment spécialisée dans les appareils d'électrostimulation et s'est imposée au fil du temps, comme l'alliée du personnel médical ainsi que des sportifs les plus exigeants. Très proche de ses clients et de leurs désirs, cette entreprise n'hésite pas non plus à s'investir dans le monde scientifique. C'est d'ailleurs grâce à leur ouverture que cette étude a pu être lancée puisque la société nous a gracieusement mis deux appareils à disposition pour la durée de la récolte de données.

Le modèle utilisé pour la séance de récupération est le « Compex Runner » (voir Fig. 15), spécialement développé pour les coureurs. Il possède un nombre considérable de programmes dédiés à la prévention, à la préparation, à des antidouleurs ainsi qu'à la récupération. C'est donc à l'aide de cet appareil et avec la confiance de la société que cette recherche a été réalisée.



Fig. 15 : « Compex Runner »

¹⁷ Saut réactivité (pliométrie)/ Saut détente (CMJ). Consulté durant les tests. Disponible sur : http://www.myotest.com/index.php?option=com_content&view=article&id=129&Itemid=143&lang=fr

3.3.8 Présentation de la fonction récupération active de l'appareil

Le « Compex Runner » propose 3 programmes de récupération :

- Récupération active
- Récupération effort intense
- Diminution des courbatures

Après avoir discuté des objectifs de cette étude avec leur représentant, Donato Stefanelli, celui-ci nous a conseillé d'utiliser le programme de récupération active. Selon lui et d'après son expérience, ce mode est le plus apprécié auprès des consommateurs de la gamme « Compex Runner » et le plus couramment choisi.

Voici une présentation détaillée du contenu de ce programme et des bénéfices alloués par la société d'après le manuel¹⁸ officiel :

Objectifs : favoriser et accélérer la récupération musculaire après un effort intense pour limiter la fatigue. L'électrostimulation dans ce cas aide à :

- Recyclage des déchets (lactate, ammonium, métabolites) de la contraction musculaire, grâce à une forte augmentation du débit sanguin local
- Soulager la douleur par accroissement naturel de la production d'endorphines (effet anti douleur)
- Relaxer et contracturer les muscles pour obtenir un effet décontracturant

Selon l'entreprise, le programme doit être utilisé dans les 3 heures qui suivent la fin de l'effort pour permettre d'accélérer le processus de récupération et de favoriser ainsi les bénéfices de l'entraînement et la progression de l'athlète.

¹⁸ Fiche de programme récupération active. Consulté le 12 juillet 2012. Disponible sur : <http://www.compex-runner.com/ch/fr/programme-recuperation-active-15.php>

3.3.9 Paramétrages et protocole de la séance d'électrostimulation

La séance de récupération active avec le « Compex Runner » s'est déroulée immédiatement après la séance d'endurance sur tapis roulant. Les paramètres ainsi que les conditions cadres relatives à la stimulation ont suivi les recommandations strictes du guide de l'appareil :

Positionnement et tailles des électrodes :

Les électrodes ont été positionnées sur les points moteurs du muscle quadriceps comme indiqué par la fiche d'utilisation du « Compex Runner ». Ces points sont censés correspondre à différents muscles utilisés lors de la course à pied. Pour préciser davantage cette localisation, l'étude de Novacheck (1998) sur la biomécanique de la course, démontre que les principaux muscles sollicités sur cette région musculaire durant la course à pied (cycle biomécanique) sont les chefs du quadriceps (muscle droit fémoral, muscle vaste latéral, vaste médial et vaste intermédiaire). Afin d'étendre la stimulation sur cette zone au maximum, des électrodes de type rectangulaires ont été utilisées. Cette variante, contrairement à l'utilisation de petites électrodes, permet aussi de limiter certaines sensations désagréables pouvant survenir si les impulsions électriques sont trop ciblées. Pour garantir une excellente conduction du courant sur les zones stimulées, les sujets ont été soumis à un rasage des zones de contact des électrodes.

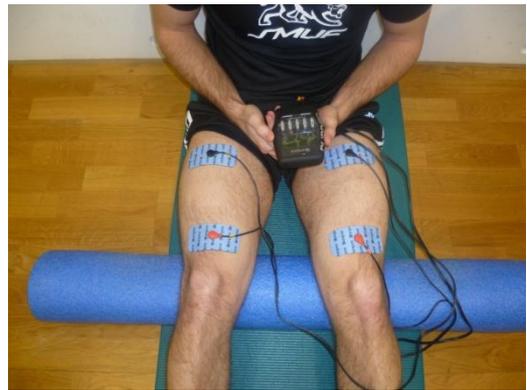


Fig. 16 : position adoptée par les sujets lors de la séance de récupération active par électrostimulation

Lors de la séance, les sujets étaient en position assise, appuyés contre un mur et les jambes légèrement surélevées à l'aide d'un cylindre en mousse placé sous leurs genoux (voir Fig. 16). Cet élément supplémentaire a été employé pour assurer une décontraction complète des muscles quadriceps constituant un élément essentiel lors de l'utilisation du programme de récupération active.

Durée de la séance et intensité de courant :

La séance de récupération active était de 24 minutes, ce qui correspondait à la durée configurée par l'appareil. L'intensité du courant n'a pas été fixée à une valeur prédéfinie, néanmoins, elle devait être suffisante pour créer des contractions musculaires visibles (grosses vibrations du muscle) chez le sujet. Ceux-ci étaient donc libres de faire varier l'intensité du courant selon leur ressenti et d'après leur propre tolérance.

Fréquence :

Le programme de récupération active du « Compex Runner » utilise des stimulations de basses fréquences. Les 24 minutes du cycle de récupération sont divisées en plusieurs séquences de 2 à 3 minutes allant de 9Hz à 1Hz. Cette technique constitue, d'après la marque, le « Golden Standard » pour la récupération.

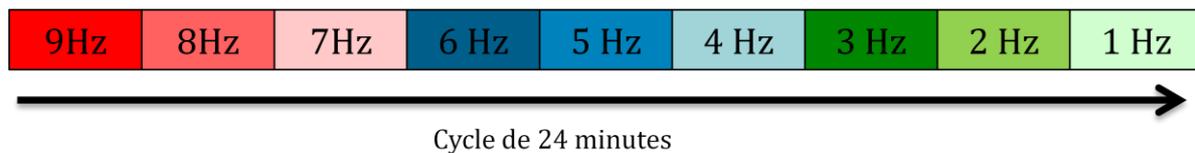


Fig. 17 : aperçu de la variation des fréquences durant le programme de récupération active

3.3.10 Séance de récupération passive

Contrairement au groupe E, les sujets du groupe C n'ont pas pris part à une séance d'électrostimulation suite à la séance d'endurance. Etant donné qu'ils font partie du groupe contrôle, les sujets ont été engagés à suivre une récupération passive. Pendant les 24 minutes destinées à la séance d'électrostimulation, il leur a été demandé de se mettre dans la même position que celle adoptée pour l'électrostimulation et de la tenir jusqu'à la fin de ce délai.

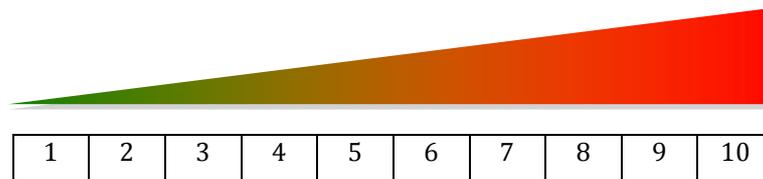
3.3.11 Présentation et utilisation du questionnaire perceptif

Afin d'évaluer la perception et le ressenti des sujets en termes de douleur musculaire, de fatigue et de bien-être entre les deux groupes, C et E, un questionnaire¹⁹ spécifique a été

¹⁹ Cf. annexe 3

mis au point. Ce document a été réalisé à partir d'un outil d'analyse semblable ayant déjà fait ses preuves dans une enquête menée par Carcano, Isebrand, Wieczorek et Boudjemaa (2010). Le questionnaire est basé sur des échelles visuelles analogiques (EVA) de 10 échelons (voir Fig. 18). Pour chacun des trois domaines (douleur musculaire au niveau des quadriceps, fatigue au niveau des quadriceps, bien-être) une échelle est présente.

Exemple :



1 = aucune douleur musculaire au niveau des quadriceps 10 = douleur musculaire maximale au niveau des quadriceps

Fig. 18 : échelle analogique visuelle (EVA)

Les sujets ont été priés de remplir le questionnaire à trois moments du test :

- Directement après la séance d'endurance sur tapis roulant
- Après la séance de récupération active ou passive
- Tout à la fin de la séance de tests

A la fin des tests, les résultats du questionnaire ont été rassemblés dans un document informatique et traités pour les groupes C et E à titre comparatif.

3.3.12 Traitement des résultats des tests de sauts et du questionnaire

Tests de sauts :

Les résultats des tests de sauts pour les groupes C et E ont été transférés dans le logiciel Myotest Pro. Cette manœuvre a permis de les classer et de posséder ainsi une structure claire pour la suite du travail. Grâce aux multiples fonctions de cette plateforme d'investigation les résultats ont pu être traités aisément et de manière précise. A

noter que le programme en question offre une riche palette d'options permettant de décomposer et d'analyser précisément chaque moment de l'expression musculaire du geste sportif. Les représentations graphiques finales des résultats ont été créées à partir de Microsoft Excel édition 2007 (Redmond, USA).

Questionnaire perceptif :

Comme pour les tests de sauts, les résultats du questionnaire perceptif ont été retranscrits et représentés graphiquement à l'aide de Microsoft Excel.

3.4 Analyse statistique

Afin de procéder aux tests statistiques, les données numériques de tous les tests pour les groupes C et E ont été regroupées dans une fiche Excel. A l'aide de l'outil d'analyse (macro supplémentaire) du logiciel, un test-t bilatéral (Test de Student) pour échantillon indépendant (hétéroscédastique) a été utilisé pour analyser ces données. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$ pour tous les tests.

3.5 Design de l'étude

Tab. 4 : planification du travail de recherche durant l'année 2012

Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Mise en place de la méthodologie / Récolte des données / Rédaction de l'introduction et partie méthodologique			Analyse et interprétation des résultats		Remise de la première version	Réserve
Définir les séances de tests en laboratoire avec les sujets des groupes C et E			Exposition des résultats et rédaction de la discussion/conclusion		Corrections	Réserve

4 Présentation des résultats

Cette partie du travail expose les principaux résultats de cette recherche sous forme de tableaux et de graphiques. Le détail des données de tests (sauts + questionnaire perceptif) et les variables non traitées dans cette partie (CMJ ; force, sauts réactifs ; temps de contact avec le sol), figurent en annexe 4.

Dans un premier temps, les résultats globaux des tests de sauts (CMJ + réactifs) et du questionnaire perceptif sont présentés sous forme de tableaux. Par la suite, les résultats importants issus des tests sont exposés sous forme de graphique (histogrammes + lignes) pour chaque type de test.

Les deux couleurs utilisées dans les tableaux et les graphiques sont toujours représentatives des deux groupes : contrôle (C) = **bleu** ; expérimental (E) = **rouge**

4.1 Résultat globaux

Tab. 5 : représentation des moyennes des variables mesurées par les sauts CMJ durant les 3 phases de test : 1= initial ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable.

	Phases	Hauteur en cm	Puissance en W/kg	Force en N/kg	Vitesse en cm/s
Sauts CMJ	1	36.92 ± 3.7	49.82 ± 7.2	25.18 ± 2.8	250.7 ± 17.3
		38.38 ± 4.9	47.7 ± 2.8	24.46 ± 1.8	252.3 ± 10.9
	T-test indice p	p = 0.466	p = 0.408	p = 0.510	p = 0.808
	2	34.94 ± 4.9	48.96 ± 6.6	25.83 ± 1.9	243.7 ± 21.5
		37.22 ± 5.1	49.19 ± 6.0	25.36 ± 1.6	250.2 ± 21.3
	T-test indice p	p = 0.327	p = 0.936	p = 0.569	p = 0.506
	3	35.08 ± 4.6	48.68 ± 4.4	25.99 ± 1.7	244.5 ± 15.5
		37.98 ± 4.7	49.8 ± 5.3	26.07 ± 2.3	251.6 ± 16.3
	T-test indice p	p = 0.18	p = 0.617	p = 0.932	P = 0.332

Tab. 6 : représentation des moyennes des variables mesurées par les sauts de réactivité durant les 3 phases de test : 1= initial ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable.

	Phases	Hauteur en cm	Temps de contact au sol en ms	Indice de réactivité	Stiffness en kN/m
Sauts réactifs	1	27.35 ± 3.6	129.3 ± 15.5	3.687 ± 0.3	56.99 ± 10.4
		28.66 ± 2.4	121.9 ± 10.8	3.988 ± 0.4	63.94 ± 11.7
	T-test indice p	p = 0.358	p = 0.235	p = 0.126	p = 0.178
	2	26.34 ± 4.0	136.2 ± 23.2	3.423 ± 0.5	57.42 ± 17.2
		27.87 ± 4.1	128.7 ± 8.7	3.708 ± 0.3	56.17 ± 9.9
	T-test indice p	p = 0.410	p = 0.359	p = 0.164	p = 0.845
	3	25.27 ± 4.0	139.2 ± 23.5	3.324 ± 0.5	52.65 ± 13.8
		28.57 ± 5.7	130 ± 12.5	3.699 ± 0.3	55.42 ± 8.0
	T-test indice p	p = 0.158	p = 0.293	p = 0.088	P = 0.593

Tab. 7 : représentation des moyennes des variables mesurées par le questionnaire perceptif durant les 3 phases de test : 1= directement après la séance d'endurance ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable. * = valeur significative

	Phases	Douleur musculaire indice EVA	Fatigue musculaire indice EVA	Bien-être indice EVA
Questionnaire perceptif	1	3.7 ± 1.3	5.15 ± 1.2	3.15 ± 1.7
		4.65 ± 1.7	5.35 ± 1.5	3.35 ± 1.8
	T-test indice p	p = 0.188	p = 0.750	p = 0.806
	2	3 ± 1.1	3.7 ± 1.5	2.15 ± 0.8
		2.25 ± 1.0	2.65 ± 1.1	1.35 ± 0.4
	T-test indice p	p = 0.134	p = 0.099	p = 0.024*
	3	3.45 ± 1.1	3.4 ± 1.3	2.4 ± 0.8
		2.5 ± 0.8	3.4 ± 0.9	1.95 ± 0.8
	T-test indice p	p = 0.055	p = 1	p = 0.254

4.2 Résultats comparatifs pour les sauts CMJ

Variable : « hauteur » :

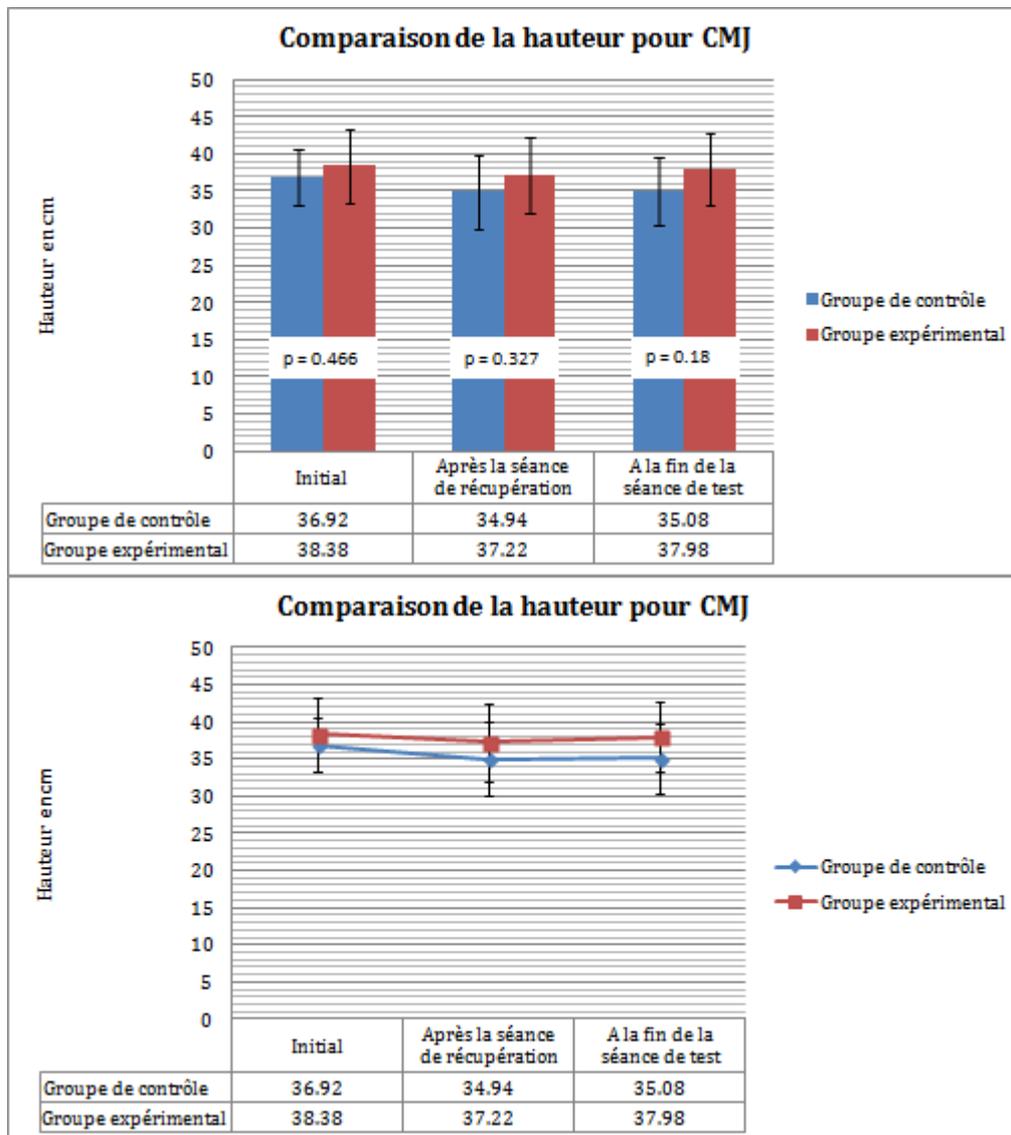


Fig. 19 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « hauteur » aux trois étapes de test CMJ

Pour la variable « hauteur » du test CMJ, les résultats acquis aux trois moments de test ne révèlent pas de différences significatives ($p > 0.05$). Néanmoins, la Fig. 19 démontre que le groupe expérimental a subi une perte légèrement inférieure au groupe de contrôle entre le test initial et celui de la fin de la séance de test. Le groupe de contrôle perd en moyenne 1.84 cm (36.92 ± 3.7 cm – 34.94 ± 4.9 cm) entre les deux stades de test alors que le groupe expérimental montre une différence de 0.4 cm (38.38 ± 4.9 cm – 37.98 ± 4.7 cm). L'indice « p » (0.18) sans être significatif, renforce cette observation

puisque'il s'agit de la valeur comparative la plus basse répertoriée durant les 3 moments de test. Les résultats relevés suite à la séance de récupération affichent aussi une différence mais dans une tranche plus étroite.

Variable « vitesse » :

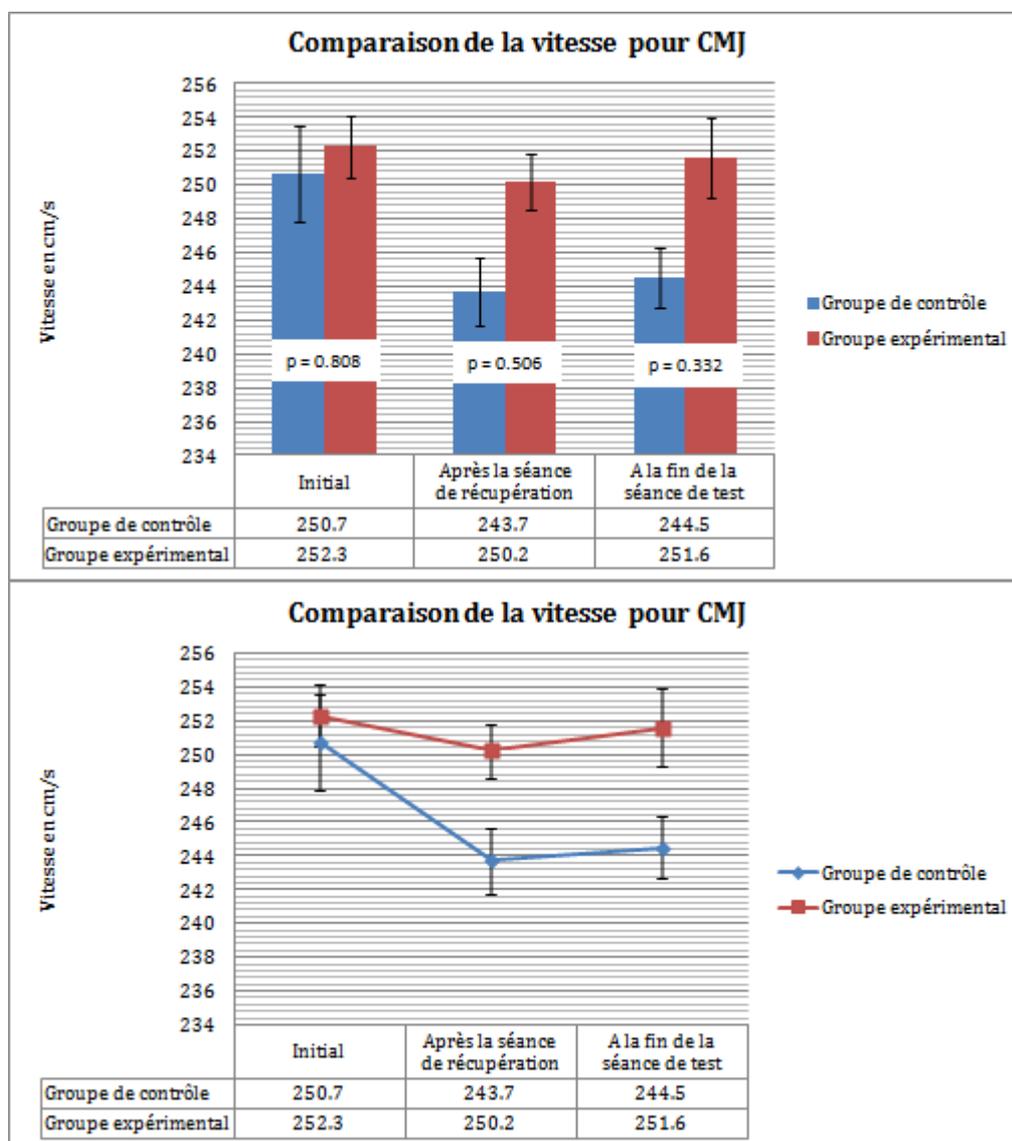


Fig. 20 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « vitesse » aux trois étapes de test CMJ

La variable « vitesse », comme celle de la « hauteur », n'indique pas de différences significatives du point de vue statistique ($p > 0.05$). Cependant, les deux graphiques (Fig. 20) affichent des valeurs sensiblement différentes entre les phases de test. En effet, lors du test initial, les deux groupes possèdent des valeurs assez similaires ($C = 250.7 \pm 17.3$

cm/s ; $E = 252.3 \pm 10.9$ cm) alors que l'écart après la séance de récupération est supérieur (243.7 ± 21.5 cm pour C et 250.2 ± 21.3 cm pour E) comme celui à la fin de la séance de test (244.5 ± 15.5 cm pour C et 251.6 ± 16.3 cm pour E). Sans pour autant dégager des indices statistiques significatifs, la vitesse semble être une variable ayant pour le moins été influencée entre les groupes C et E.

Variable « puissance » :

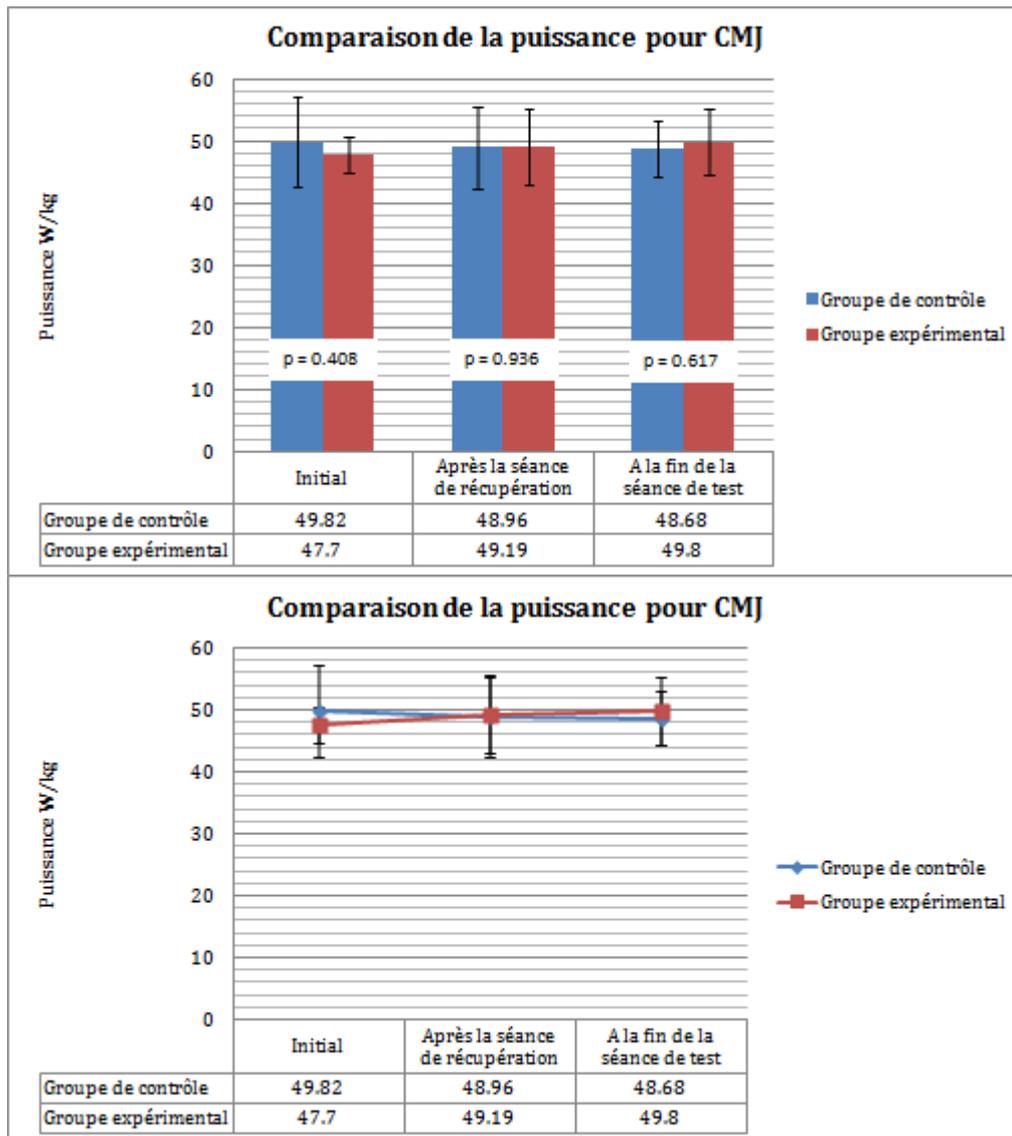


Fig. 21 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « puissance » aux trois étapes de test CMJ

Les résultats de la variable « puissance » sont également non significatifs ($p > 0.05$). Toutefois, comme pour la hauteur et la vitesse, ils démontrent une propriété intéressante visible sur la Fig. 21. Au départ (test initial), le groupe expérimental paraît

légèrement inférieur (47.7 ± 2.8 W/kg) que le groupe de contrôle (49.82 ± 7.2 W/kg) mais suite à la deuxième série de saut (après la séance de récupération) ainsi que lors de la dernière série (à la fin de la séance de test) l'indice de puissance pour le groupe expérimental tend à croître légèrement alors que celui du groupe de contrôle diminue.

4.3 Résultats comparatifs pour les sauts de réactivité

Variable « hauteur » :

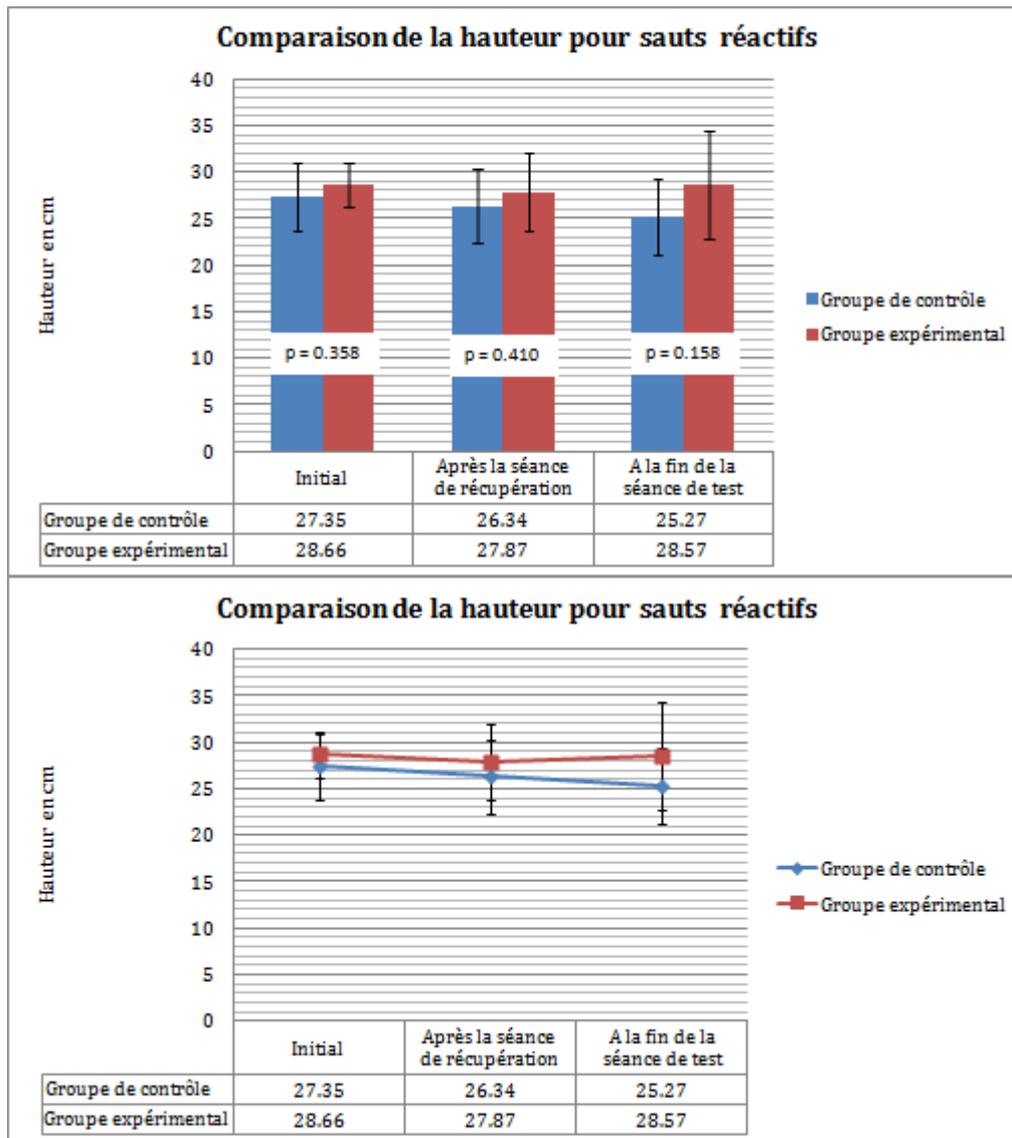


Fig. 22 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « hauteur » aux trois étapes de test pliométrique

Les résultats de la variable « hauteur » pour les tests pliométriques sont parallèles à ceux des tests de CMJ. Les indices statistiques « p » ne présentent pas de valeur significative au cours des trois stades de test. La Fig. 22 ressemble aussi à la Fig. 19 (voir

p. 46), le groupe expérimental (28.66 ± 2.4 cm) dispose d'un petit avantage au test initial face au groupe de contrôle (27.35 ± 3.6 cm). Au cours du deuxième test (après la séance de récupération) les valeurs des deux groupes restent assez semblables mais, en fin de séance de test, les écarts deviennent plus grands et le groupe expérimental (28.57 ± 5.7 cm) reste beaucoup plus proche de sa valeur initiale que le groupe de contrôle (25.27 ± 4.0 cm). De même, c'est à la fin de test que la valeur de « p » (0.158) est la plus basse.

Variable « réactivité » :

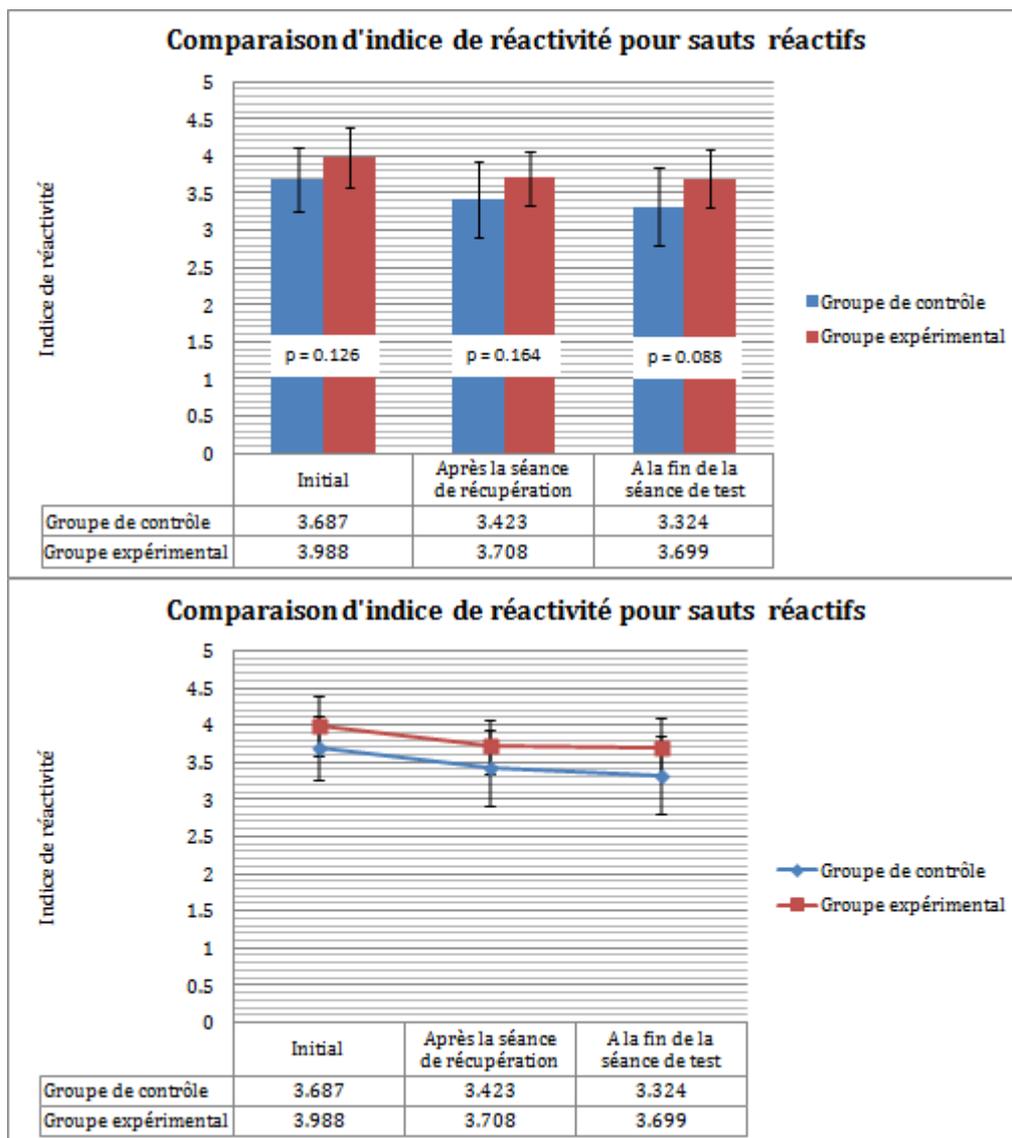


Fig. 23 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « réactivité » aux trois étapes de test pliométrique

L'indice de réactivité ne révèle pas de différences significatives non plus, c'est d'ailleurs aussi la variable la plus stable entre les deux groupes pour chaque stade de test. Même si

le groupe expérimental (3.98 ± 0.4) a un léger avantage au début face au groupe de contrôle (3.687 ± 0.3), celui-ci ne grandit pas ou que très faiblement au cours de la séance de test.

Variable « stiffness » :

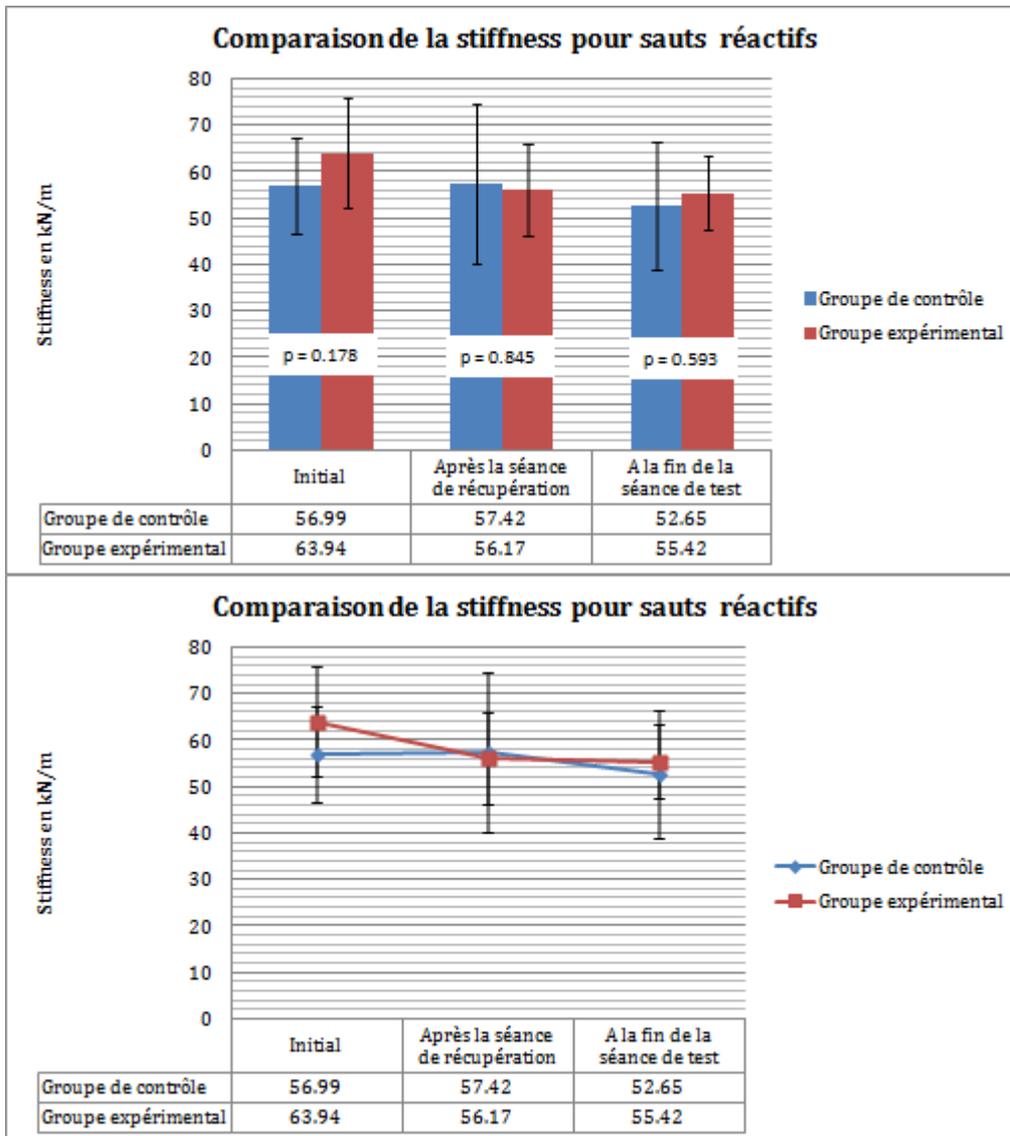


Fig. 24 : représentation sous forme d’histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « stiffness » aux trois étapes de test pliométrique

La stiffness semble être à son tour une variable intéressante sans pour autant révéler des indices statistiques significatifs. Contrairement à la direction générale des résultats, la différence plus ou moins marquée entre les deux groupes ($C = 56.99 \pm 10.4$ kN/m ; $E = 63.84 \pm 11.7$ kN/m) lors du test initial s’amenuise fortement lors du test suivant la séance de récupération ($C = 57.42 \pm 17.2$ kN/m ; $E = 56.17 \pm 9.9$ kN/m) et demeure

proche en fin de séance de test ($C = 52.65 \pm 13.8$ kN/m ; $E = 55.42 \pm 8.0$ kN/m). Les variations d'écart-types, surtout entre le test initial et celui après la séance de récupération sont aussi plus marquées pour le groupe de contrôle. Pour sa part, le groupe expérimental possède des valeurs qui diminuent continuellement entre les trois stades de test.

4.4 Résultats comparatifs pour le questionnaire perceptif

Ressenti de la « douleur musculaire » :

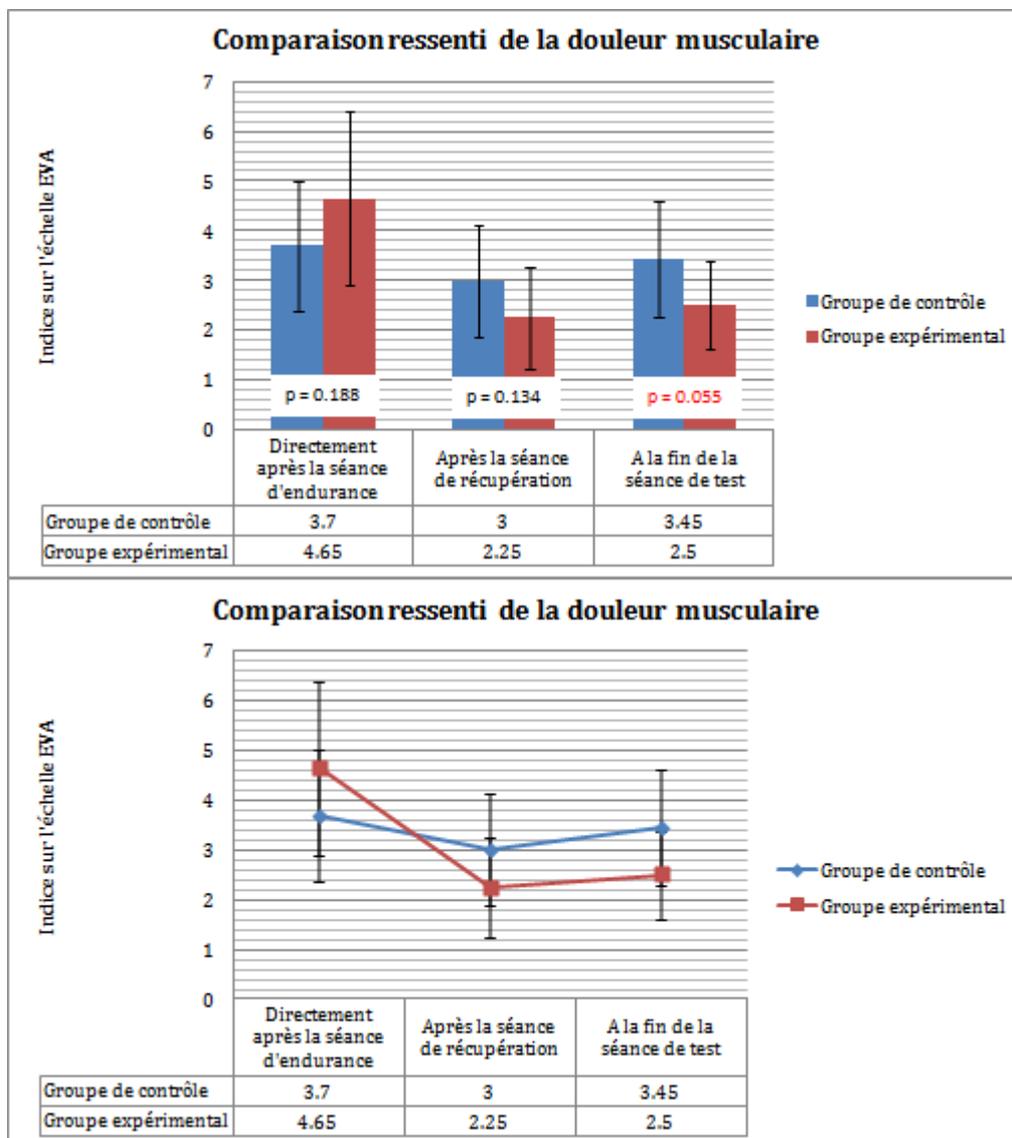


Fig. 25 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « ressenti de la douleur musculaire » aux trois étapes de test

Le premier résultat du questionnaire perceptif en termes de ressenti de la douleur montre des éléments fort intéressants (voir. Fig. 25 p. 52). Suite à la séance d'endurance, l'indice reporté par le groupe expérimental (4.65 ± 1.7) est plus élevé que celui du groupe de contrôle (3.7 ± 1.3). Mais après la séance de récupération, l'indice du groupe expérimental (2.25 ± 1) chute par rapport au groupe de contrôle (3 ± 1.1). Encore plus marquant, l'écart entre les deux indices ($C = 3.45 \pm 1.1$; $E = 2.5 \pm 0.8$) augmente davantage à la fin de la séance de test ce qui engendre un indice de « p » de 0.055 qui correspond à une différence proche du seuil de significativité.

Fatigue musculaire :

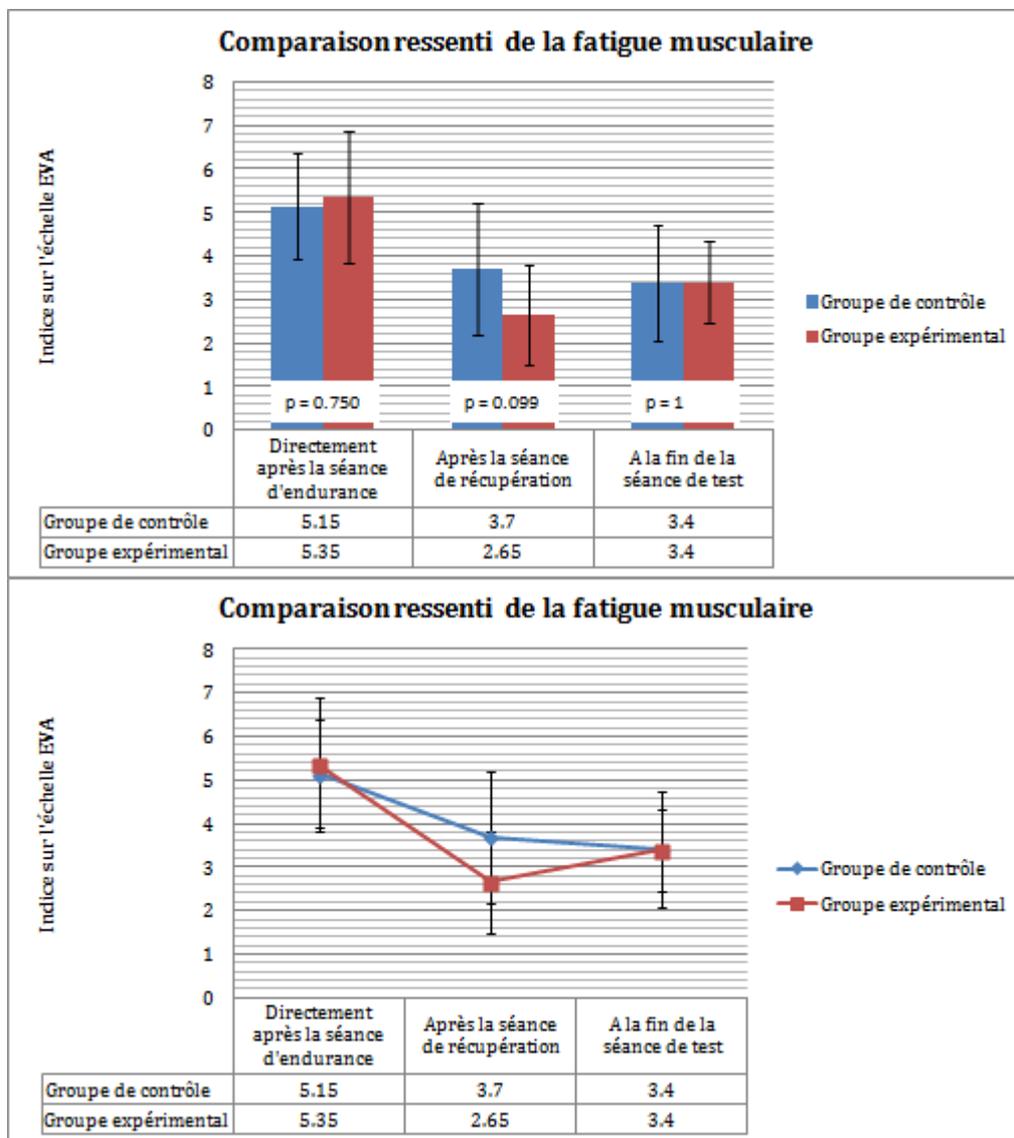


Fig. 26 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « ressenti de la fatigue musculaire » aux trois étapes de test

Le ressenti de la fatigue ne démontre pas de différences autant marquées que pour la douleur. Cependant, les valeurs comparatives entre le premier relevé (directement après la séance d'endurance) et le second (après la séance de récupération) révèlent que le groupe expérimental (indice de 5.35 ± 1.5 et 2.65 ± 1.1) semble avoir perçu moins de fatigue musculaire suite à la séance de récupération que le groupe de contrôle (indice de 5.15 ± 1.2 et 3.7 ± 1.5). L'indice « p » (0.099) confirme cette observation mais demeure trop élevé pour obtenir une différence significative. En fin de séance de test, les résultats sont étonnamment parfaitement identiques entre les deux groupes (C = 3.4 ± 1.3 ; E = 3.4 ± 0.9).

Bien-être :

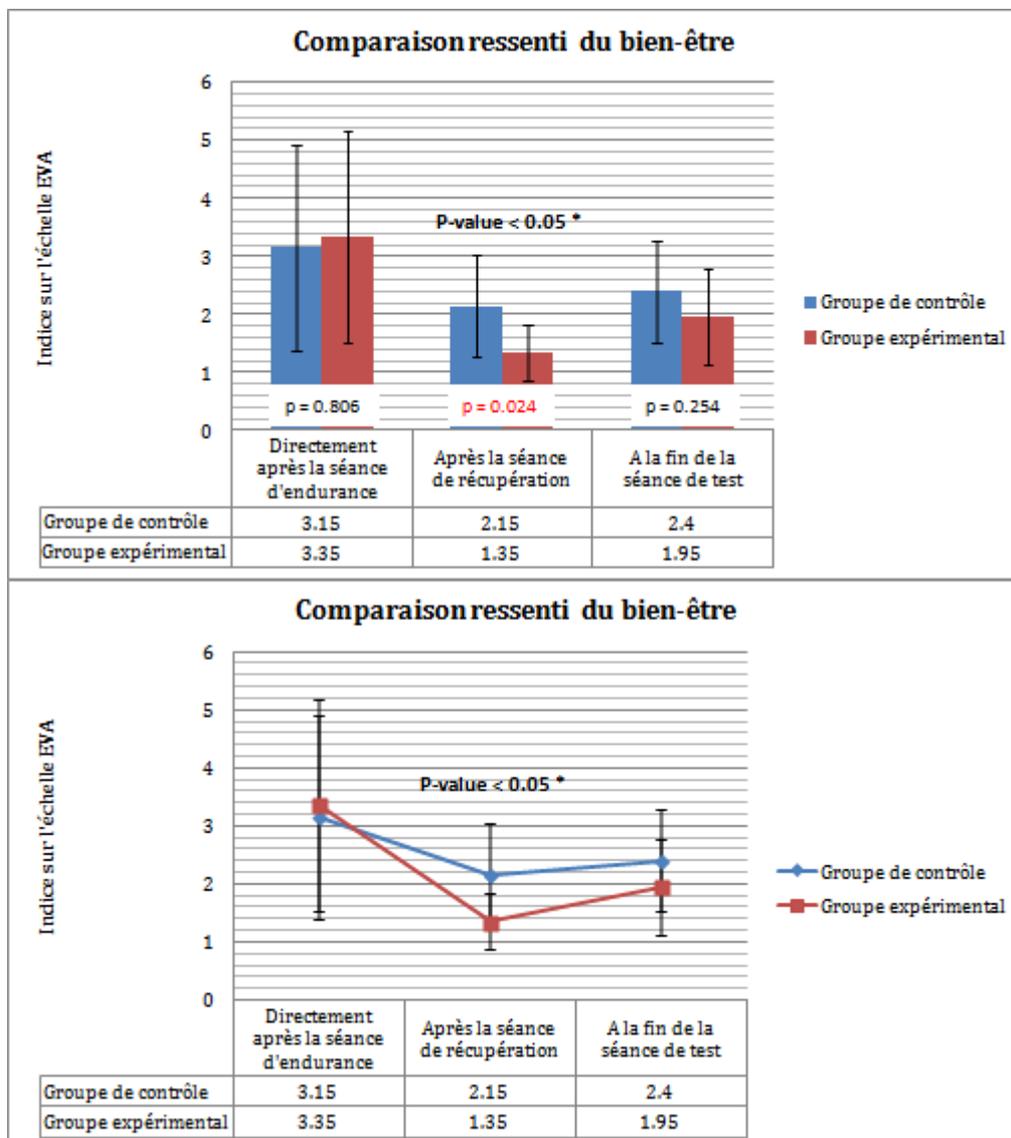


Fig. 27 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « bien-être » aux trois étapes de test

La dernière variable du questionnaire perceptif constitue le véritable résultat significatif de cette recherche. Dans un premier temps, l'indice de bien-être retranscrit pas les deux groupes après la séance d'endurance est pour ainsi dire similaire ($C = 3.15 \pm 1.7$; $E = 3.35 \pm 1.8$). C'est suite à la séance de récupération que l'indice du groupe expérimental (1.35 ± 0.4) présente une valeur inférieure au groupe de contrôle (2.15 ± 0.8). Cette différence est attestée par un indice de $p < 0.05$ (0.024) synonyme de significativité. En fin de séance, le groupe expérimental démontre également un indice inférieur (1.95 ± 0.8) au groupe de contrôle (2.4 ± 0.8) mais dont la différence n'est pas statistiquement significative.

5 Discussion

5.1 Résultats des tests de sauts

L'analyse comparative entre le groupe de contrôle et expérimental n'a pas révélé de résultats statistiquement significatifs ($p > 0.05$) pour l'ensemble des variables analysées. Par conséquent, il n'est pas possible de répondre positivement à la première question de recherche de cette étude qui supposait que l'apport d'une séance de récupération par électrostimulation suite à un effort endurant de moyenne intensité, avait la capacité d'augmenter le potentiel de récupération physiologique à court-terme.

Néanmoins, abstraction faite de la rigueur scientifique, certaines valeurs retrouvées ainsi que leur représentation sous forme de graphique ont permis d'entrevoir une légère tendance positive pour le groupe expérimental, surtout entre la deuxième et la troisième phase de test.

5.1.1 Homogénéité entre les deux groupes de test

Avant de tirer un bilan final sur les résultats, il est à notre avis important de soulever une caractéristique générale apparente au sein des tests de sauts. Lors du test initial, le groupe expérimental possède un petit avantage perceptible pour plusieurs variables par rapport au groupe de contrôle. Les performances issues des sauts CMJ et réactifs pour les variables hauteur (CMJ ; C = 36.92 ± 3.7 cm, E = 38.38 ± 4.9 cm, Réactif ; C = 27.35 ± 3.6 cm, E = 28.66 ± 2.4 cm) vitesse (CMJ ; C = 250.7 ± 17.3 cm/s, E = 252.3 ± 10.9 cm/s), réactivité (Réactif ; 3.687 ± 0.3 , E = 3.988 ± 0.4) et stiffness (Réactif ; 56.99 ± 10.4 kN/m, E = 63.94 ± 11.7 kN/m) sont les principaux indices touchés par ce phénomène. Contrairement à une première pensée négative, cet élément permet de mettre en évidence un facteur essentiel et positif pour cette recherche. Il existe manifestement des disparités de base entre le groupe de contrôle et expérimental mais celles-ci sont limitées et ne sont pas pour autant valables pour l'ensemble des variables. En termes de force (C = 25.18 ± 2.8 N/kg ; E = 24.24 ± 1.8 N/kg), de puissance (C = 49.82 ± 7.2 W/kg ; E = 47.7 ± 2.8 W/kg) et de temps de contact au sol, (C = 129.3 ± 15.5 cm ; E = 121.9 ± 10.8 cm) le contraste est d'ailleurs minime ou presque inexistant. Par conséquent, ces caractéristiques démontrent que les deux groupes sélectionnés possèdent des propriétés contractiles au niveau des muscles des jambes quasi analogues. Pour soutenir davantage cette idée, il est possible de faire un rapprochement avec une étude citée au

sein d'un ouvrage sur les propriétés neuromusculaires (Innocenti et al. 2006, cités par Dufour, 2009). En mesurant la qualité d'un CMJ par enregistrement des variations d'accélération sur une plateforme de force, les auteurs ont constaté que, chez des experts, la durée de la phase d'accélération négative est plus courte (environ 20% vis-à-vis d'un sédentaire) et que la phase positive (taux de montée de force) est plus élevée. Ces deux facteurs sont donc décisifs et exercent une influence sur l'expression de la force enregistrée.

Pour notre part, les indices de force et de vitesse (égale à l'intégrale de l'accélération)

mesurés initialement à l'aide du Myotest Pro pour le CMJ sont pratiquement identiques entre les deux groupes ce qui semble dire qu'ils sont encore une fois représentatifs d'un niveau pour ainsi dire équivalent et homogène.

Si, au contraire, les différences avaient été trop grandes à l'origine, les indices statistiques auraient sans doute révélés des différences significatives mais celles-ci auraient été biaisées par une hétérogénéité trop prononcée entre les deux groupes de test ce qui aurait été défavorable pour nos travaux. Dans notre recherche, l'homogénéité de l'ensemble des sujets de l'étude constitue donc un atout majeur et nous permet tout en restant prudents, d'apporter des indications et d'émettre certaines hypothèses en l'absence d'indicateurs statistiques significatifs.

5.1.2 Comparaison de la tendance entre la deuxième et la troisième phase de test

Pour revenir plus en détail sur une propriété énoncée brièvement à la fin du point 5.1, une particularité étonnante des résultats provient du fait que le groupe de contrôle démontre une tendance de différence de performance plus marquée (sauf pour la variable stiffness) dès la deuxième phase de test de même qu'en fin de séance en comparaison au groupe expérimental. On remarque par exemple que, pour la variable hauteur (tests CMJ et réactifs), le groupe de contrôle voit sa différence augmenter par

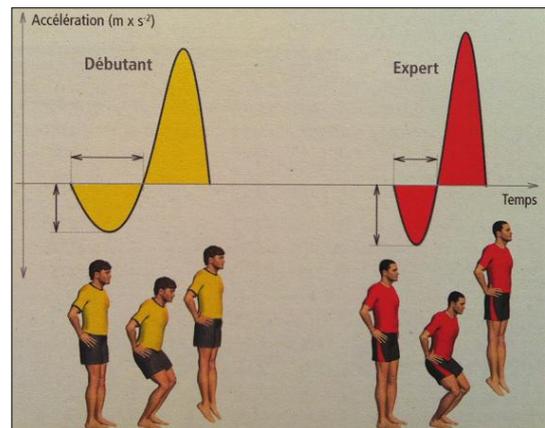


Fig. 28 : pour un CMJ, le contre-mouvement est plus rapide et le front de montée de force plus élevé chez un expert comparativement à un débutant (Dufour, 2009, p. 113)

rapport au groupe expérimental dès la deuxième phase de test (voir Fig. 19 p. 46 et Fig. 22 p. 49) et qu'au final, le groupe expérimental indique également une performance plus proche de sa valeur initiale que le groupe de contrôle (voir Tab. 5 p. 44). Une autre variable encore plus touchée est la vitesse lors des sauts CMJ. En deuxième phase de test, le groupe de contrôle exécute une performance nettement moins bonne qu'en début de test. En revanche, le groupe expérimental connaît aussi une diminution de performance mais de manière nettement moins marquée (voir Fig. 20 p. 47). Sans être scientifiquement significatives, ces inégalités entre les phases de test suggèrent que les sujets du groupe de contrôle ayant pris part à une séance de récupération passive aient éprouvé plus de peine à rééditer leurs performances initiales. Par ailleurs, la baisse de performance mesurée par la variable vitesse démontre également que celle-ci peut être un marqueur de fatigue potentiel pour des exercices en endurance. La fatigue étant souvent associée à une baisse de coordination, elle peut donc transparaître par une perte de vitesse (ici pour les sauts CMJ). Dans ce sens, la vitesse qui fait souvent partie des facteurs de condition physique appartiendrait davantage aux qualités de coordination.

A propos des tendances observées, il est aussi probable que la séance d'électrostimulation ait eu un réel impact sur la régénération des propriétés musculaires contractiles des sujets du groupe expérimental. Cependant, cette suggestion est à prendre avec précaution et nécessite d'autres investigations beaucoup plus poussées comme celle Warren et al. (2011) par exemple, en intégrant des mesures de lactate, d'activité de la créatine kinase ou encore du flux sanguin sur les zones stimulées pour pouvoir acquérir une véritable valeur scientifique.

Toutefois, afin de proposer une éventuelle cause physiologique en rapport à la revue de littérature, il est possible que les sujets du groupe expérimental soient issus de disciplines sportives où les sauts sont fréquents (basketball, football, gymnastique aux agrès). Par conséquent, leur capacité de régénération vis-à-vis de cette forme particulière d'exercice peut être meilleure que celle du groupe de contrôle en bénéficiant d'un degré d'accoutumance plus marqué. Cette éventualité avait aussi été soulignée par l'étude de Tessitore et al. (2008) par le fait qu'une meilleure préparation à un type d'exercice ainsi qu'une excellente hygiène de vie puissent avoir un impact sur

les capacités de régénération. Pourtant, même si cette théorie reste plausible, il est difficile de fournir une explication objective à cette tendance.

C'est pourquoi il s'avère plus judicieux, à notre avis, de chercher une réponse d'ordre perceptive. D'autant plus que cette proposition peut être mise en relation avec le principal résultat significatif de cette recherche. Les prochains points tentent donc d'apporter une réponse objective en fonction du cadre méthodologique fixé et proposent des comparaisons avec des résultats d'études antérieures.

5.2 Résultat du questionnaire perceptif

Grâce aux résultats émis par le questionnaire perceptif analogue à celui utilisé par Carcano et al. (2010), nous avons pu donner une réponse positive à la deuxième question de recherche de cette étude qui soutenait que l'électrostimulation pouvait atténuer le sentiment de fatigue musculaire post-effort. Il semble donc que cette méthode d'investigation soit garante d'un potentiel révélateur pour ce qui est du ressenti et de la perception puisque la recherche dirigée par les auteurs cités avait également décelé des résultats évocateurs.

Dans notre étude, les sujets ont dû donner leur avis perceptif en termes de douleur musculaire, de fatigue musculaire et de bien-être à trois reprises ; suite à la séance d'endurance, après la séance de récupération et à la fin de la séance de test. L'indice statistique significatif ($p < 0.024$) révélé résulte de la comparaison du bien-être ressenti suite à la séance de récupération. Suite à cette réponse, il s'avère que le groupe expérimental s'est senti mieux que le groupe de contrôle après avoir pris part à une séance d'électrostimulation. Ce dernier ayant pour sa part adopté une forme de récupération passive. Par ailleurs, un deuxième indice proche d'une valeur significative ($p = 0.055$) a été trouvé en fin de séance quant à la douleur musculaire perçue par les deux groupes à cet instant. De plus, les résultats du questionnaire perceptif rejoignent la tendance générale énoncée auparavant pour les tests de saut en ce qui concerne la deuxième phase de test.

Toutes ces indications nous portent donc à croire que, dans cette recherche, la séance d'électrostimulation a engendré une influence positive sur la perception et le ressenti

des sujets du groupe expérimental et qu'elle a éventuellement, par la même occasion, eu un impact positif sur les performances post-effort (après la séance d'endurance) produites par les sujets du même groupe.

5.3 Résultats et liens avec les connaissances actuelles

En se référant à la revue de littérature de cette thématique, notre étude s'aligne sur certains résultats préalables qui accordent à l'électrostimulation une valeur plus psychologique que physiologique au sens propre. Comme l'indique une récente étude menée par Cortis, Tessitore, D'Artibale, Meeusen, Capranica (2010), les effets positifs de cette technique de récupération sont principalement obtenus pour des paramètres subjectifs et notamment, comme c'est le cas dans notre recherche, sur le sentiment de bien-être. Dans un contexte de terrain, cet effet positif sur la cognition de l'athlète pourrait aussi avoir certaines influences positives sur son attitude et par la même occasion sur les performances qui succèdent à la séance de récupération (Tessitore et al. 2008). Il n'est donc pas impossible que la tendance générale à la hausse pour la deuxième phase de test du groupe expérimental lors des tests de saut soit une conséquence de ce phénomène psychologique.

En l'occurrence, l'électrostimulation est aussi souvent citée, tout comme les massages et la cryothérapie, comme étant l'outil de récupération le plus apprécié des sportifs (Cortis et al. 2010). Par ailleurs, quelques études (Denegar, Perrin, 1992 ; Vanderthommen, Soltani, Maquet, Crielaard, Croisier, 2007 cités par Babault et al. 2011) ont également révélé une diminution modérée de la douleur liée aux courbatures suite à une séance d'électrostimulation. Cette réduction serait due aux propriétés antalgiques d'un courant de basse fréquence appliqué durant 20 à 30 minutes après l'effort et d'intensité moyenne. Dans notre étude, l'indice « p » de 0.055 récolté en fin de séance de test et synonyme de douleur musculaire montre que la séance de récupération active pour le groupe expérimental a pu également créer un impact positif sur la perception de la douleur musculaire post-effort. Cependant, la littérature stipule aussi que la diversité des méthodologies ainsi que des paramétrages rend les comparaisons difficiles, ce qui semble être le cas une fois de plus avec notre recherche. L'appareil d'électrostimulation « Compex Runner » propose des paramétrages préétablis et il est de ce fait impossible de contrôler l'ensemble des caractéristiques de stimulation (à part la fréquence et la

durée des cycles). D'ailleurs, la fonction utilisée dans notre méthodologie (récupération active) a été mise au point d'après l'expertise et les connaissances de l'entreprise Compex Médical SA dans le domaine. Ce facteur comporte malheureusement trop d'éléments variables pour juger les éventuels gains physiologiques proposés par l'appareil. De plus, comme le rapporte la littérature, la tolérance à l'intensité du courant varie fortement d'un individu à un autre, ceci ayant aussi été observé lors des séances de test. L'intensité du courant étant une des variables prépondérantes citées dans de nombreuses études (Babault et al. 2011), il est à nouveau délicat de se prononcer sur les réels effets physiologiques de notre programme face à l'hétérogénéité des intensités supportées.

5.4 Points forts de l'étude

Face à la complexité du sujet traité, cette étude a manifestement démontré certaines valeurs sur le point de vue perceptif et de ressenti du bien-être pouvant être alloué à l'électrostimulation. Le questionnaire prévu à cet effet a permis de se baser sur un outil valide et fiable ayant déjà fait ses preuves par le passé. Sans ce moyen d'investigation supplémentaire, il n'aurait tout simplement pas été possible de donner une valeur comparative aux résultats des tests de sauts. Par la même occasion, l'homogénéité des groupes de test pour les données anthropométriques, les mesures initiales de VMA, les performances initiales aux tests de sauts renforcent davantage la valeur des résultats. Cette remarque est aussi valable dans l'exécution des tests, les sujets étant tous étudiants en science du sport et de la motricité, ils n'ont éprouvé aucune difficulté à effectuer les formes d'exercices demandées.

Pour finir, la préparation et le suivi rigoureux du protocole de test en laboratoire ont garanti un déroulement des tests sans accros et dans le respect du timing suggéré. Sans pour autant être en possession d'un matériel scientifique complexe, cette étude a néanmoins su dégager certaines tendances qui semblent coïncider avec les connaissances actuelles sur le sujet.

5.5 Limites de l'étude

Il existe cependant un certain nombre de points qui pourraient être améliorés dans un souci d'exactitude et de reproductibilité:

5.5.1 Myotest Pro

Commençons par le matériel utilisé pour cette recherche. Le Myotest est un appareil qui continue d'être au centre de nombreuses publications dans le domaine du sport. Pour le moment, les avis de la communauté scientifique sont partagés. Dans certains cas, il semble que le Myotest est un moyen valide pour la mesure des propriétés contractiles musculaires et que dans d'autres, la plateforme de force ou le système « optojump ²⁰» restent les outils les plus précis en termes de reproductibilité. Selon Casartelli, Muller et Maffiuletti (2010), le Myotest est un instrument de mesure valide pour déterminer la hauteur des sauts mais les auteurs sont beaucoup plus sceptiques pour ce qui est de la vitesse ou de la puissance développée. Après avoir comparé les résultats du Myotest avec les données mesurées par le système optojump, il s'avère que de légers déplacements horizontaux lors de la poussée seraient à l'origine de perturbations conséquentes sur les résultats. Dans une autre étude, Houel, Dinu, Faury et Seyfried (2011) ont comparé des mesures du Myotest avec ceux d'une plateforme de force. Les résultats montrent que la fixation de l'appareil au niveau de la hanche du sujet et non directement sur son centre de gravité peut engendrer des imprécisions de mesures parfois grossières.

Dans le cadre de notre étude, le Myotest fut le seul instrument de mesure pour les tests de sauts. Il est donc nécessaire de prendre en compte les avertissements qui résultent de ces études. Pour une validité accrue, il serait assurément plus judicieux d'utiliser une plate-forme de force ou un système optojump.

5.5.2 Protocole de sauts et séance d'électrostimulation

Le deuxième point de ce chapitre est destiné à l'adéquation du protocole de test de sauts avec la séance d'électrostimulation. Cette fois-ci, ce ne sont pas les propriétés de l'appareil qui sont remises en question mais les caractéristiques méthodologiques

²⁰ L'OptoJump est un système de détection optique, composé d'une barre émettrice et d'une autre réceptrice. Il permet de mesurer le temps d'envol et de contact durant l'exécution d'une série de sauts avec une précision de 1/1000 seconde. Source : <http://www.optojump.ch/C-est-quoi.aspx> consulté le 24 juillet 2012

adoptées face à la forme d'exercice musculaire choisie. Le protocole de la séance d'électrostimulation est strictement affecté à la musculature du quadriceps. Cependant, si certaines études (Isear, Erickson, Worell, 1997) révèlent que le quadriceps est un des groupes musculaires les plus sollicités lors d'un squat jump qui est une forme de saut parallèle au CMJ, il serait préférable de procéder à une analyse biomécanique détaillée pour préciser cette indication. Grâce à cette combinaison, le placement des électrodes gagnerait en précision et la valeur de la séance d'électrostimulation également.

5.5.3 Séance d'endurance et fibres musculaires

Pour finir, le dernier facteur limitant de l'étude soulève à son tour une interrogation sur un deuxième rapport de concordance. Le but de la séance d'endurance était de créer une fatigue musculaire suffisante pour percevoir des différences au sein des tests de sauts post-effort par rapport au test initial. Si l'on se réfère aux résultats, il semble que l'exercice en endurance fut suffisamment élevé puisque l'on constate, en général, une diminution de performance. Néanmoins, la charge en endurance modérée suivie 20 minutes a, selon le principe d'Henneman (1974), généré une fatigue musculaire plus prononcée au niveau des fibres lentes de type I. A l'opposé, les tests de sauts à caractère purement pliométrique engagent les fibres musculaires rapides de type II voir IIa ou IIx. De ce fait, il n'est pas sûr que le cycle d'endurance censé créer une fatigue temporaire sur les membres inférieurs ait été propice pour les objectifs recherchés. Si on approfondit la réflexion, on pourrait aussi se demander quelles sortes de fatigue ont été favorisées par le test d'endurance, est-ce une fatigue périphérique ou une fatigue centrale ? Cette question comporte aussi une part d'importance, puisqu'une fatigue centrale (cognitive) peut elle aussi amener à une baisse de performance.

Ces trois points constituent certainement les limites les plus marquantes de cette étude. Sans pour autant minimiser la valeur de certains résultats, il est indispensable de prendre en compte ces précisions pour des investigations qui se voudraient plus poussées.

5.6 Perspectives de nouvelles questions de recherche

Dans le cadre d'une recherche future sur la même thématique, il serait certainement intéressant dans un premier temps d'évaluer les éventuelles différences entre une population active et une population sédentaire. Dans ce sens, on pourrait vérifier l'hypothèse lancée par Tessitore et al. (2008) proposant que le degré de récupération amélioré de sujets entraînés minimise les effets de l'électrostimulation sur une séance de récupération par rapport à un groupe de sujets non entraînés.

Une deuxième proposition serait de varier les formes d'exercices produisant une fatigue préalable. Dans ce contexte, on pourrait tenter de déterminer si l'électrostimulation exerce des influences différentes en fonction du type d'effort fourni (aérobie contre anaérobie par exemple). Une étude de la sorte permettrait aussi de mieux distinguer les types de fibres musculaires ciblées par l'électrostimulation.

Enfin, notre dernière proposition est plus matérielle cette fois-ci et certainement plus coûteuse. Elle mettrait en jeu la comparaison de nouveaux moyens destinés à la récupération musculaire comme, par exemple, le caisson à refroidissement utilisé par l'équipe de France de football durant la dernière compétition européenne. En intégrant des mesures physiologiques temporelles précises ainsi qu'un questionnaire perceptif détaillé, une étude de la sorte permettrait sans doute de donner un avis plus scientifique sur ces nouvelles méthodes.

6 Conclusion

Arrivé au terme de ce travail, il est temps de faire une synthèse des éléments et des aspects fondamentaux qui ressortent de cette étude. S'agissant des questions de recherches, nous ne sommes pas en mesure d'apporter des réponses claires surtout en ce qui concerne la première interrogation qui conférait à l'électrostimulation certains bénéfices sur les capacités de régénération musculaires post-effort d'ordre physiologiques.

Pour ce point, les résultats non significatifs trouvés sont catégoriques et rejoignent, dans la plupart des cas, les conclusions d'études précédentes (Tessitore et al. 2008, Vanderthommen et al. 2010, Babault et al. 2011). Néanmoins, sans posséder de réelles valeurs scientifiques, nous avons pu, dans certains cas, dégager une tendance positive sur les performances du groupe expérimental suite à la séance de récupération par électrostimulation. De plus, cette tendance a pu partiellement s'expliquer grâce à la réponse positive attribuée à notre deuxième question de recherche qui accordait, pour sa part, d'éventuels bénéfices d'ordre perceptif à l'électrostimulation.

Pour cette deuxième partie de l'étude, l'outil d'analyse sous forme de questionnaire mis au point par Carcano et al. (2010) était adapté à la situation et particulièrement révélateur puisqu'il nous a permis de trouver un résultat significatif ($p < 0.05$). Comme cité à deux reprises (Tessitore et al. 2008, Cortis et al. 20010), il est vraisemblable que l'électrostimulation puisse augmenter le sentiment de bien-être post-effort et aussi, dans certains cas, diminuer les sensations de douleurs liées aux courbatures (Denegar, Perrin, 1992 ; Vanderthommen, Soltani, Maquet, Crielaard, Croisier cités par Babault et al. 2010).

Cette recherche a donc permis de démontrer que l'électrostimulation, lorsqu'elle est utilisée à des fins de régénération musculaire à l'aide d'un appareil de type « Complex Runner », peut présenter des bénéfices d'ordre perceptif. En même temps, cette technique paraît, d'après nos résultats, être à l'abri d'éventuelles contre-indications et semble préférable à une récupération passive comme l'ont aussi proposé Malone et al. (2011). Cependant, la méthodologie adoptée pour notre étude possédant quelques faiblesses, ces résultats ne peuvent en aucun cas faire l'objet d'une publication à caractère officiel.

7 Remerciements

Ce travail n'est pas simplement le fruit de nombreuses heures de recherches, de rédaction, de remise en question et d'investissement personnel durant cette dernière année d'études. Il comprend aussi une série de rencontres enrichissantes, l'ouverture vers des orientations futures ainsi que le soutien inestimable de plusieurs personnes.

En premier lieu, j'aimerais citer et remercier mon vice-directeur de travail, M. Alain Rouvenaz, pour son excellent suivi et son dévouement tout au long de cette année. Je remercie également le Dr. Wolfgang Taube, mon conseiller principal. Par la même occasion, j'exprime un tout grand merci à la faculté des « Sciences du Mouvement et du Sport » de l'Université de Fribourg qui, par sa confiance, m'a permis d'utiliser ses installations durant les différentes phases de test.

Mes remerciements se destinent aussi à la Société Compex Médical SA et tout particulièrement à leur responsable de vente, Donato Stefanelli, qui m'a mis à disposition deux appareils d'électrostimulation « Compex Runner » pour la réalisation de cette étude.

A mes collègues et amis étudiants, qui ont participé de manière active et exemplaire aux différents tests, j'adresse également ma sincère reconnaissance. C'est grâce à leur engagement et leur disponibilité que ce projet a pu être mené à bien.

Enfin, je désire exprimer ma gratitude à ma famille et à mes amis proches qui m'ont soutenu tout au long de ce travail et encouragé dans les bons comme dans les mauvais moments.

8 Bibliographie

Ouvrages généraux

Divert, C. (2005). *Thèse de doctorat : Influence du chaussage sur les caractéristiques mécaniques et le coût énergétique de la course à pied*. Université de Saint-Etienne.

Dufour, M. (2009). *Les diamants neuromusculaires : l'explosivité et la puissance musculaire*. Tome I, Chavéria : Editions Volodalen.

Farhi, D. & Smadja, R. (1996). *Biophysique*. Paris : ESTEM.

Millet, G. (2006). *L'endurance*. Revue EPS.

Monod, H., Flandrois, R., Vanderwalle, H. (2007). *Physiologie du sport : Bases physiologiques des activités physiques et sportives*. (6e éd.) Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson.

Nguyen, S-H., Bourouina, R., Pfister-Allin, A-C. (2008). *Manuel d'anatomie et de physiologie*. (4e éd.) RUEIL-MALMAISON : Lamarre.

Pfeifer, H. & Harre, D. (1982). *Fundamentals and methods of endurance training: Principles of Sports Training*. Berlin : Sportverlag.

Portmann, M. (1991). *Thèse de doctorat : Amélioration de la force musculaire au moyen de la stimulation électrique et application à l'entraînement sportif*. Université de Montreal.

Articles scientifiques

Andersen, J.L. & Schjerling, P. & Saltin, B. (2000). Muscle, genes and athletic performance. *Scientific American*, 283, 48-55.

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

Bax, L. & Staes, F. & Verhagen, A. (2005). Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris ? A systematic review of randomised controlled trials. *Sports Medicine*, 35, 191-212.

Bigard, A.X. (2004). Réponses du muscle à l'exercice et récupération. *Science & Sports*, 19, 246-263.

Bishop, P.A. & Jones, E. & Woods, A.K. (2008). Recovery from training: a brief review, *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 1015-1024.

Carcano, Y. & Isembrand, B. & Wieczorek, G. & Boudjemaa, B. (2010). Le ressenti de sportifs lors d'un massage de récupération en termes de douleur et fatigue musculaires et de bien-être. *Kinésithérapie la Revue*, 104-105, 46-50.

Casartelli, N. & Muller, R. & Maffiuletti, N.A. (2010). Validity and reliability of the Myotest accelerometric system for assessment of vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 11, 3186-3193.

Cortis, C. & Tessitore, A. & D'Artibale, E. & Meeusen, R. & Capranica, L. (2010). Effects of post-exercise recovery interventions on physiological, psychological, and performance parameters. *International Journal of Sports Medicine*, 31, 327-335.

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.

Coudreuse, J.M. & Dupont, P. & Nicol, C. (2004). Douleurs musculaires post-effort. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 47, 290-298.

Dehail, P & Duclos, C. & Barat, M. (2008). Electrostimulation et gain de force musculaire. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 51, 441-451.

Denegar, C.R. & Perrin, D.H. (1992). Effects 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.

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. (1997). Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Experimental Brain Research*, 114, 117-123.

Gondin, J. & Cozzone, J.P. & Bendahan, D. (2011). Is high-frequency neuromuscular electrical stimulation a suitable tool for muscle performance improvement in both healthy humans and athletes ?. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2473-2487.

Gregory, C.M. & Bickel, S.C. (2005). Recruitment Patterns in Human Skeletal Muscle During Electrical Stimulation. *Journal of the American Physical Therapy Association*, 85, 358-364.

Heyman, E. & Geus, B.D. & Mertens, I. & Meeusen, R. (2008). Effects of Four Recovery Methods on Repeated Maximal Rock Climbing Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 0195-9131/09/4106-1303/0.

Houel, N. & Dinu, D. & Faury, A. & Seyfried, D. (2011). Accuracy and reliability of the Myotest Pro system to evaluate a squat jump. *Procedia Enginerring*, 13, 434-438.

Isear, J.A. & Erickson, J.C. & Worell, T.W. (1997). EMG analysis of lower extremity muscle recruitment patterns during an unloaded squat. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29, 532-539.

Maffiuletti, N.A. (2010). Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation. *European Journal of Applied Physiology*, 110, 223-234.

Malone, J.K. & Coughlan, G.F. & Crowe, L. & Gissane, G.C. & Caulfield, B. (2011). The physiological effects of low-intensity neuromuscular electrical stimulation (NMES) on short-term recovery from supra-maximal exercise bouts in male triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, DOI 10.1007/s00421-011-2212-9.

Mathieu-Thépaut, C. (1998). Electrostimulation et recrutement différentiel des unités motrices. *Annales de Kinésithérapie*, 25, 3, 115-118.

Mendell, L.M. (2005). The size principle: a rule describing the recruitment of motoneurons. *Journal of Neurophysiology*, 93, 3024-3026.

Neric, F. & Beam, W. & Brown, L. & Wiersma, L. (2009). Comparison of swim recovery and muscle stimulation on lactate removal after sprint swimming. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23, 9, 2560-2567.

Novacheck, T.F. (1998). The biomechanics of running. *Gaitposture*, 7(1), 77-95.

Parker, M.G. & Bennett, M.J. & Hied, M.A. & Hollar, A.C. Roe, A.A. (2003). Strength Response in Human Quadriceps Femoris Muscle During 2 Neuromuscular Electrical Stimulation Programs. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therap*, 33, 719-726.

Sesboüé, B. & Guincestre, J.Y. (2006). La fatigue musculaire. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 49, 257-264.

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, 5, 1402-1412.

Vanderthommen, M. & Crielaard, J.M. (2001). Electromyostimulation en médecine du sport. *Revue médicale de Liege*, 56, 5, 391-395.

Vanderthommen, M. & Duchateau, J. (2007). Electrical Stimulation as a Modality to Improve Performance of the Neuromuscular. System. *Exercise and Sport Science Review*, 35, 4, 180-185.

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 Exercices Science*, 15, 143-149.

Warren, C.D. & Brown, L.E. & Landers, M.R. & Stahura, K.A. (2011). Effect of Three Different Between-Inning Recovery Methods on Baseball Pitching Performance. *Journal of Strenght and Conditioning Research*, 25, 3, 683-688.

Ziltener, J.L. & Chantraine, A. (1996). Méthodologie de la stimulation électrique fonctionnelle. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 40, 43-48.

Références électroniques

Compex Runner - Fiche de programme récupération active. Consulté le 12 juillet 2012.

Disponible sur : <http://www.compex-runner.com/ch/fr/programme-recuperation-active-15.php>

Myotest Pro - Guide Quick Start Myotest Pro. Consulté le 12 juillet 2012.

Disponible sur : http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf

Bibliographie

Myotest Pro - saut réactivité (pliométrie) et saut détente (CMJ). Consulté durant les tests. Disponible sur :

http://www.myotest.com/index.php?option=com_content&view=article&id=129&Itemid=143&lang=fr

Optojump – Définition. Consulté le 25 juillet 2012.

Disponible sur : <http://www.optojump.ch/C-est-quoi.aspx>

9 Table des illustrations

Figures :

Fig. 1 : pile à colonne d'Alessandro Volta et expériences sur des grenouilles par Luigi Galvani.....4

Disponible sur:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/29/Luigi_Galvani_Experiment.jpeg/220px-Luigi_Galvani_Experiment.jpeg

Fig. 2 : comparaison entre le trajet de l'influx nerveux lors d'une contraction volontaire (gauche) et celle émise par un courant électrique par le biais d'une électrode placée sur la peau (droite).....7

Disponible sur :

http://storage.djoglobal.eu/fi_FI/Compex/Images/Illustrations/muskel_NMES_eng.jpg

<http://www.trikapalanet-fr.com/wp-content/uploads/2009/10/les-motoneurones-du-trikapalanet.jpg>

Fig. 3 : représentation graphique des points de la chronaxie et de la rhéobase en fonction de la force du stimulus et de sa durée9

Disponible sur :

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Rheobase_chronaxie.png

Fig. 4 : formes de courants unidirectionnels : a : rectangulaire ; b : triangulaire ; c : à intensité progressive 11

Fig. 5 : formes de courants bidirectionnels : a : symétrique ; b : asymétrique 12

Fig. 6 : recrutement des fibres musculaires selon la loi d'Henneman, l'ordre d'activation des types de fibres est fonction de l'intensité..... 18

Fig. 7 : chaîne de commande de la contraction musculaire, la fatigue peut survenir en n'importe quel point de la chaîne (Sesboué, Guincestre, 2006, p. 259) 21

Fig. 8 : formule utilisée pour calculer les indices de VMA en km/h..... 30

Fig. 9 : Myotest Pro et accessoires 33

Fig. 10 : Myotest Pro positionné sur un sujet 33

Disponible sur :

http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf, p .11

Fig. 11 : aperçu d'un mouvement de saut réactif	34
Disponible sur :	
http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf , p. 11	
Fig. 12 : exemple de résultats de test de réactivité	35
Disponible sur:	
http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf , p.12	
Fig. 13 : aperçu d'un mouvement de saut counter movement jump	36
Disponible sur :	
http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf , p.13	
Fig. 14 : exemple de résultats de test de détente	37
Disponible sur :	
http://downloads.myotest.com/documents/QuickStart_Guide_FR.pdf , p.14	
Fig. 15 : « Compex Runner »	38
Fig. 16 : position adoptée par les sujets lors de la séance de récupération active par électrostimulation	40
Fig. 17 : aperçu de la variation des fréquences durant le programme de récupération active.....	41
Fig. 18 : échelle analogique visuelle (EVA).....	42
Fig. 19 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « hauteur » aux trois étapes de test CMJ.....	46
Fig. 20 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « vitesse » aux trois étapes de test CMJ.....	47
Fig. 21 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « puissance » aux trois étapes de test CMJ.....	48
Fig. 22 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « hauteur » aux trois étapes de test pliométrique	49
Fig. 23 : représentation sous forme d'histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « réactivité » aux trois étapes de test pliométrique	50

Fig. 24 : représentation sous forme d’histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « stiffness » aux trois étapes de test pliométrique	51
Fig. 25 : représentation sous forme d’histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « ressenti de la douleur musculaire » aux trois étapes de test	52
Fig. 26 : représentation sous forme d’histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « ressenti de la fatigue musculaire » aux trois étapes de test	53
Fig. 27 : représentation sous forme d’histogrammes et de lignes des résultats des groupes C (bleu) et E (rouge) pour la variable « bien-être » aux trois étapes de test	54
Fig. 28 : pour un CMJ, le contre-mouvement est plus rapide et le front de montée de force plus élevé chez un expert comparativement à un débutant (Dufour, 2009, p. 113)	57

Tableaux :

Tab. 1 : aperçu des étapes d'évaluation ainsi que du contenu d'une séance de test..... 29

Tab. 2 : présentation des valeurs de VMA à 75% en km/h pour les groupes C et E 31

Tab. 3 : fraction de VO2max maintenue en compétition sur des durées différentes par des coureurs dont l'endurance est plus ou moins élevée (Millet, 2006, p. 19) 32

Tab. 4 : planification du travail de recherche durant l'année 2012..... 43

Tab. 5 : représentation des moyennes des variables mesurées par les sauts CMJ durant les 3 phases de test : 1= initial ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable..... 44

Tab. 6 : représentation des moyennes des variables mesurées par les sauts de réactivité durant les 3 phases de test : 1= initial ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable. 45

*Tab. 7 : représentation des moyennes des variables mesurées par le questionnaire perceptif durant les 3 phases de test : 1= directement après la séance d'endurance ; 2= après la séance de récupération ; 3= à la fin de la séance de test pour C= bleu et E = rouge. La valeur de l'indice du T-test « p » est aussi visible pour chaque variable. * = valeur significative 45*

10 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. »

Courtaman, le 22 août 2012

11 Droits d'auteur

« Je soussigné reconnait 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. »

Courtaman, le 22 août 2012

12 Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : questionnaire de préparation « check-list » aux tests de Swiss Olympic version française et allemande

Annexe 2 : protocole de séance de test en laboratoire

Annexe 3 : questionnaire perceptif

Annexe 4 : représentations graphiques des résultats des tests non intégrés au travail CMJ (variable force) et réactifs (variable temps de contact avec le sol) / Banque de données de tous les tests de sauts et du questionnaire perceptif

Annexe 1 : version française

Liste de contrôle: Préparation		Qualitätssicherung SOV 2000 SWISS OLYMPIC MEDICAL CENTERS		
	Nom:	Prénom:	Date de naissance:	
	Poids:	Taille:	Swiss Olympic Card: <input type="checkbox"/> Pas de carte	
	Date et heure du test:	/ . h	Sélection: <input type="checkbox"/> Aucune sélection	
	1. Phase d'entraînement	<input type="checkbox"/> Préparation <input type="checkbox"/> Pré-compétition <input type="checkbox"/> Compétition <input type="checkbox"/> 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 <input type="checkbox"/>			
	Régime hyperglucidique <input type="checkbox"/>	Régime amaigrissant <input type="checkbox"/>		
	Régime dissocié <input type="checkbox"/>	Régime riche en graisses (début < 4 jours) <input type="checkbox"/>		
	Dernier repas: Quand ? _____	Composition: _____		
	Caféine (dern. 12 h) <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui quantité/quoi : _____		
	Alcool (veille au soir) <input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> oui quantité/quoi : _____		
5. Maladies	(au cours des 14 derniers jours) <input type="checkbox"/> aucune <input type="checkbox"/> : _____			
6. Accidents et blessures	(depuis le dernier test) <input type="checkbox"/> aucune <input type="checkbox"/> : _____			
7. Douleurs/gêne le jour du test	<input type="checkbox"/> aucune <input type="checkbox"/> : _____			
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	<input type="checkbox"/> gauche <input type="checkbox"/> droite <input type="checkbox"/> ambidextre			
	Définir (p ex. jambe d'appel): _____			
13. Autres interférences possibles	(sommeil, voyage, etc.) _____			

Annexe 1 : version allemande

Checkliste Athletenvorbereitung

Qualitätsentwicklung Swiss Olympic

SWISS OLYMPIC MEDICAL CENTERS

Name: _____ Vorname: _____ Geb.datum: _____

Gewicht: _____ Grösse: _____ Swiss-Olympic-Card-Typ: keine Card

Testdatum/Testzeit: _____ / _____ Uhr Kader: kein Kader

1. **Trainingsphase** Aufbau Vorwettkampfphase Wettkampf
Rehabilitation

2. **Letzter Wettkampf** Wann: _____ Was: _____

3. **Bestleistung** (Weite/ Zeit/ Rang): _____

4. **Training** Trainingsumfang: _____ h/Woche (Jahresdurchschnitt)

	Art	Gesamt-Dauer				Gesamt-Intensität		
		<60'	60-120'	>120'	>300'	locker	mittel	hart/Intervall
heute:	_____	<input type="checkbox"/>						
gestern:	_____	<input type="checkbox"/>						
vorgestern:	_____	<input type="checkbox"/>						

4. **Ernährung** Normal

Kohlenhydrat-Diät Diät zur Gewichtsreduktion

Trennkost Fett-Diät (Beginn < 4 Tg)

Letzte Mahlzeit vor (Zeit): _____ Was : _____

Coffein (letzte 12h) nein ja Menge/ Was : _____

Alkohol (Vorabend) nein ja Menge/ Was : _____

5. **Krankheit** (letzte 14 Tage): keine : _____

6. **Verletzungen/Unfälle** (seit letztem Test): keine : _____

7. **Beschwerden am Testtag** keine : _____

8. **Regelm. Medikamente** _____ letzte Einnahme: _____

9. **Supplemente** (Bsp. Kreatin): _____ letzte Einnahme: _____

10. Nur für Frauen noch keine Menstruation

Menstruation Zyklusdauer 21-35 Tg 36-90 Tg keine

Letzte Menstruation vor : _____ Tagen Pille ja nein

11. **Befindlichkeit** 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Ankreuzen (wie fühle ich mich heute: 1=katastrophal, 10=super)

12. **Test-Motivation** 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Ankreuzen (Wie stark bin ich für den Test motiviert: 1=überhaupt nicht, 10=maximal)

13. **dominante Seite** nur falls Krafttest links rechts beidseits
definieren (Schussbein, Sprungbein usw.): _____

14. **Andere mögliche Einflussfaktoren** _____

52

Annexe 2 :

Protocole de test



Groupe de contrôle (récupération passive)

1. Accueil
2. Echauffement de 5' personnel
3. Test de sauts CMJ 10 répétitions
4. Test de sauts réactifs 20 répétitions
5. 2 min d'échauffement sur tapis roulant à 8.5 km/h
6. Séance d'endurance 20 min 75% de VMA sur tapis roulant
7. 3 min prendre position pour la régénération passive
8. 24 minutes de régénération passive
9. 2 min prendre position pour les sauts
10. Test de sauts CMJ 10 répétitions
11. Test de sauts réactifs 20 répétitions
12. 10 min de pause inactive
13. Test de sauts CMJ 10 répétitions
14. Test de sauts réactifs 20 répétitions
15. Remerciements et surprise !

Total en min ~1h30 min

Groupe expérimental (récupération par EMS)

1. Accueil
2. Echauffement 5' personnel
3. Test de saut CMJ 10 répétitions
4. Test de sauts réactifs 20 répétitions
5. 2 min d'échauffement sur tapis roulant à 8.5 km/h
6. Séance d'endurance 20 min 75% de VMA sur tapis roulant
7. 3 min prendre position pour la régénération active
8. 24 minutes de régénération active par EMS
9. 2 min prendre position pour les sauts
10. Test de sauts CMJ 10 répétitions
11. Test de sauts réactifs 20 répétitions
12. 10 min de pause inactive
13. Test de sauts CMJ 10 répétitions
14. Test de sauts réactifs 20 répétitions
15. Remerciements et surprise !

Total en min ~1h30 min

Annexe 3 :

Travail de Master Julien Pasquier

Mars/Avril 2012

Questionnaire :

« Perception et ressenti des sujets après la séance de récupération par électrostimulation ou passive, en termes de douleur, de fatigue musculaire et de bien-être »

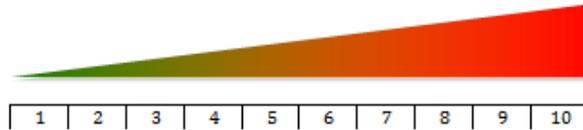
Nom : _____

Prénom : _____

Récupération par « EMS » ou « Passive » : _____

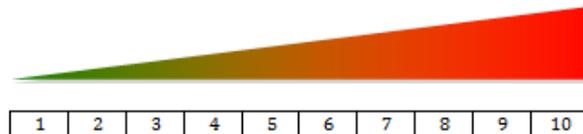
1. Directement après la séance d'endurance :

Douleur musculaire



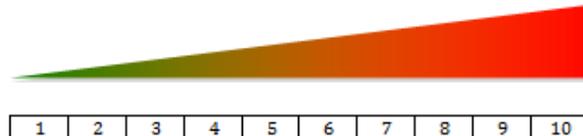
1 = aucune douleur musculaire au niveau des quadriceps 10 = douleur musculaire maximale au niveau des quadriceps

Fatigue musculaire



1 = aucune fatigue musculaire au niveau des quadriceps 10 = fatigue musculaire maximale au niveau des quadriceps

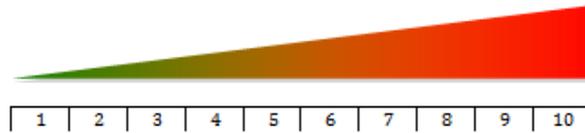
Bien-être



1 = « je me sens très bien » 10 = « ça ne va pas du tout »

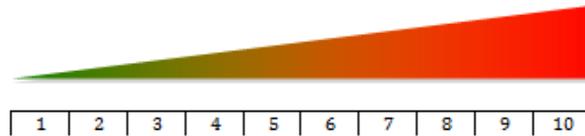
2. Après la séance de récupération par « EMS » ou passive :

Douleur musculaire



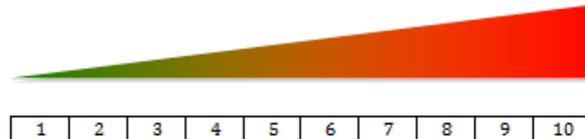
1 = aucune douleur musculaire au niveau des quadriceps 10 = douleur musculaire maximale au niveau des quadriceps

Fatigue musculaire



1 = aucune fatigue musculaire au niveau des quadriceps 10 = fatigue musculaire maximale au niveau des quadriceps

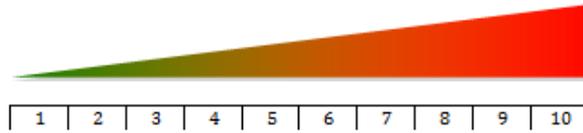
Bien-être



1 = « je me sens très bien » 10 = « ça ne va pas du tout »

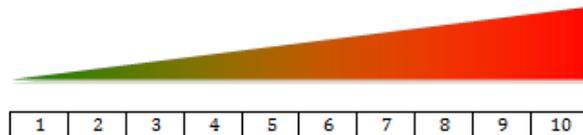
3. A la fin de la séance de test

Douleur musculaire



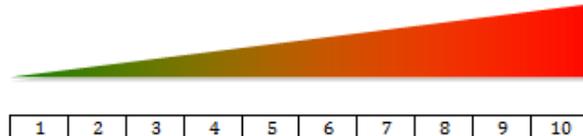
1 = aucune douleur musculaire au niveau des quadriceps 10 = douleur musculaire maximale au niveau des quadriceps

Fatigue musculaire



1 = aucune fatigue musculaire au niveau des quadriceps 10 = fatigue musculaire maximale au niveau des quadriceps

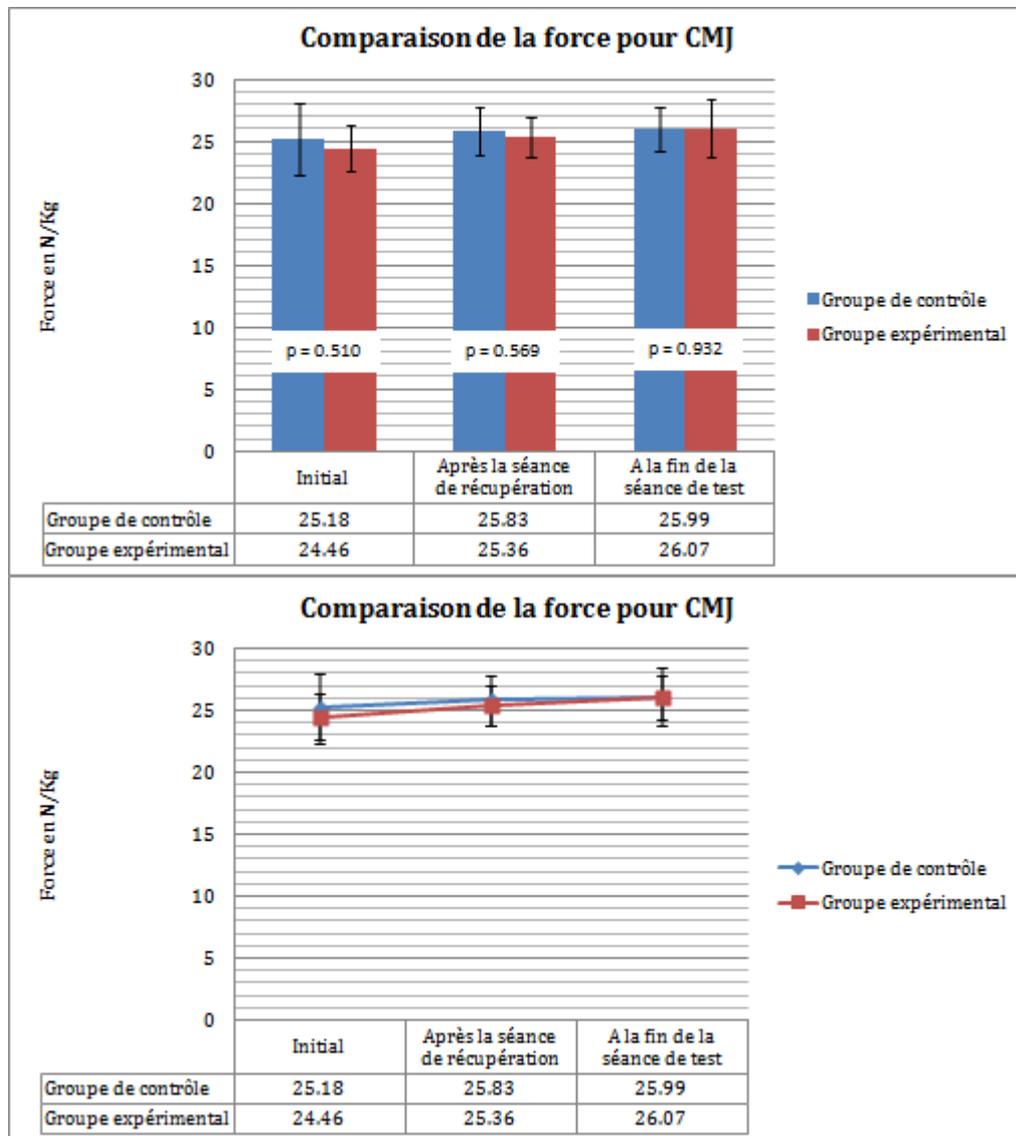
Bien-être



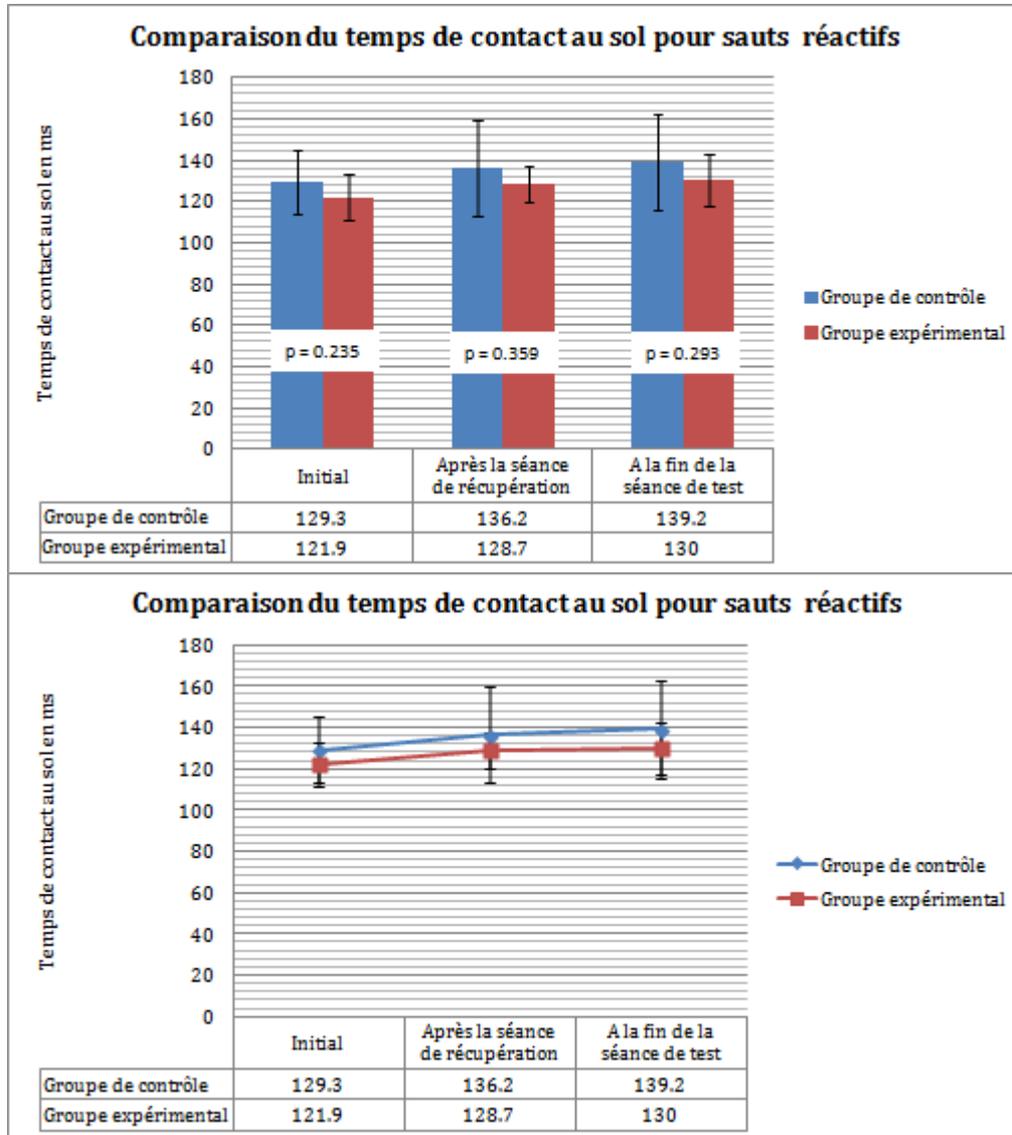
1 = « je me sens très bien » 10 = « ça ne va pas du tout »

Annexe 4 :

Résultats de la variable force pour CMJ



Résultats de la variable temps de contact au sol pour les sauts réactifs



Banque de données des tests de sauts

Résultats des tests de sauts groupe de Contrôle				Résultats CMJ avant endurance (initial)				Résultats SJ avant endurance (initial)			
N°	Utilisateurs	Récupération	N° Myotest	cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m
				Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness
1	x1	Passif	User 5	38.1	41.9	23.1	233	26.9	126	3.72	62.6
2	x2	Passif	User 6	40.7	65.6	31.3	282	24.5	102	4.38	61.2
3	x3	Passif	User 13	43.5	52.8	26.2	265	30.9	122	4.11	63.5
4	x4	Passif	User 14	37.8	53.4	25.8	262	35.8	140	3.85	46
5	x5	Passif	User 15	31.8	40.7	21.3	228	25.4	122	3.72	55.2
6	x6	Passif	User 16	34.9	44.7	24.2	233	24.3	122	3.67	62.5
7	x7	Passif	User 17	39.6	48.9	23.4	255	28.6	122	3.97	69.4
8	x8	Passif	User 1 bis	35.5	45.9	23	243	26.5	159	2.93	33.6
9	x9	Passif	User 2 bis	35	53.8	26.4	262	24.1	135	3.28	62
10	x10	Passif	User 3 bis	32.3	50.5	27.1	244	26.5	143	3.24	53.9
Moyenne				36.92	49.82	25.18	250.7	27.35	129.3	3.687	56.99
Ecart-type				3.715971534	7.267400575	2.834627156	17.33365384	3.636313762	15.58524944	0.435483129	10.44386582

Résultats des tests de sauts groupe Expérimental				Résultats CMJ avant endurance (initial)				Résultats SJ avant endurance (initial)			
N°	Utilisateurs	Récupération	N° Myotest	cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m
				Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness
1	x1	EMS	User 1	41	48.8	23.1	264	29.9	129	3.84	62.8
2	x2	EMS	User 2	27.9	49.1	28.3	234	29.1	141	3.46	37.5
3	x3	EMS	User 3	33.5	44.8	22.3	244	24.7	120	3.74	71.3
4	x4	EMS	User 4	40.8	48.3	23.8	261	29.5	109	4.51	59.9
5	x5	EMS	User 7	43.3	53.3	26.8	265	25.2	125	3.61	70.7
6	x6	EMS	User 8	35.3	48	24.5	251	29	117	4.13	66
7	x7	EMS	User 9	43.8	46.7	23.4	264	27.4	115	4.12	82.7
8	x8	EMS	User 10	38.7	47.3	24.1	243	33	127	4.08	62.9
9	x9	EMS	User 11	41.8	42.2	23.2	244	28.5	131	3.67	57.3
10	x10	EMS	User 12	37.7	48.5	25.1	253	30.3	105	4.72	68.3
Moyenne				38.38	47.7	24.46	252.3	28.66	121.9	3.988	63.94
Ecart-type				4.96315312	2.895206767	1.8385985	10.91431272	2.434565898	10.8571533	0.402845435	11.72331011

Annexes

Résultats CMJ après récupération				Résultats SJ après récupération				Résultats CMJ à la fin de séance de test				Résultats SJ à la fin de séance de test			
cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m	cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m
Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness	Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness
38.6	43	23.6	230	25.5	134	3.41	62.6	38.1	48.3	25.7	247	26.1	139	3.32	57.7
40.1	61.8	29.1	277	23.3	106	4.13	64.2	40.1	56.3	27.3	266	24.3	115	3.88	62.3
40.8	54.2	27.8	262	34.4	138	3.74	61.1	41.4	53.1	28.6	261	30.3	125	3.98	66.7
36	52.9	27.3	257	32.7	143	3.61	57.5	36.4	52.4	27.8	255	33.2	144	3.63	44.2
30.6	42.4	22.4	232	24.7	120	3.73	49.5	30.5	41.9	22.3	231	22.4	118	3.63	56.2
35	47	25.9	234	25.9	126	3.65	57	32.9	45.7	25.4	232	22.9	122	3.54	59.9
37.8	51.4	24.7	258	22.3	116	3.66	87.8	38.1	51.2	25.3	259	22.7	128	3.36	65.9
35.7	51.8	25.2	257	26	181	2.54	25.7	35.4	47.2	24.5	244	27.9	192	2.48	20.7
29.2	44.5	26.2	223	23.4	129	3.08	71.4	30.5	45.9	26.7	227	22.2	150	2.83	48.1
25.6	40.6	26.1	207	25.2	169	2.68	37.4	27.4	44.8	26.3	223	20.7	159	2.59	44.8
34.94	48.96	25.83	243.7	26.34	136.2	3.423	57.42	35.08	48.68	25.99	244.5	25.27	139.2	3.324	52.65
4.980673761	6.616847185	1.982170527	21.59243695	4.008657298	23.27516559	0.504073407	17.23883213	4.605745205	4.444172214	1.799660462	15.52238527	4.04833299	23.51736947	0.523857487	13.86957101
Résultats CMJ après récupération				Résultats SJ après récupération				Résultats CMJ à la fin de séance de test				Résultats SJ à la fin de séance de test			
cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m	cm	W/kg	N/kg	cm/s	cm	ms	indice	kN/m
Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness	Hauteur	Puissance	Force	Vitesse	Hauteur	Temps contact col	Réactivité	Stiffness
42.8	62.2	25.2	292	32.7	136	3.78	63.9	43.4	61.2	26.2	284	38.8	145	3.87	49.5
29.6	46.2	27.5	228	26.8	130	3.61	42.5	29.8	50.1	29.5	235	18	117	3.27	61.7
30.5	40.1	22.2	223	20.5	119	3.43	70.4	33	40.5	21.6	230	22.9	121	3.58	68.8
41.4	53.3	25.7	265	28.9	139	3.49	41.5	42.4	50.6	25.9	260	29.2	124	3.92	47.9
43.4	51.1	25.3	264	29.4	131	3.73	70	43.4	52.5	25.9	270	26.4	130	3.57	66.1
32.5	44.5	25.6	235	25.3	121	3.76	56.2	33.4	46.2	25.6	242	31.6	128	3.96	51.7
42	50.7	27	262	31.4	126	4.03	55.9	41.3	120	28.8	255	30.7	120	4.16	60.5
37.8	46.1	23.1	246	31	135	3.72	56.5	38.3	46.5	23.3	247	31.3	154	3.22	51.5
36.6	46	26.5	233	22.1	137	3.09	51.7	37.6	47.6	27.5	243	24.8	141	3.18	50.3
35.6	51.7	25.5	254	30.6	113	4.44	53.1	37.2	50.9	26.4	250	32	120	4.26	46.2
37.22	49.19	25.36	250.2	27.87	128.7	3.708	56.17	37.98	49.8	26.07	251.6	28.57	130	3.699	55.42
5.147771902	6.070593967	1.629041982	21.31144711	4.106918282	8.705681414	0.359685047	9.91733051	4.747584181	5.362213473	2.340963714	16.33809454	5.781012983	12.52552949	0.392582617	8.099080881

Annexes

Banque de données du questionnaire perceptif

Résultats du questionnaire groupe de Contrôle				Directement après la séance d'endurance			Après la séance de récupération passive			A la fin de séance de test		
N°	Utilisateurs	Récupération	N° Myotest	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être
1	x1	Passif	User 5	5	7	4	4	7	4	4	3.5	2.5
2	x2	Passif	User 6	5	5	4	4	3	2	2	2	2
3	x3	Passif	User 13	1.5	6.5	1	1	2	1	3	2	1.5
4	x4	Passif	User 14	5	6	7	2	2	2	4	2	2
5	x5	Passif	User 15	3	6	4	3	4	3	5	5	4
6	x6	Passif	User 16	2	3.5	1	1.5	2.5	1	1.5	2	1
7	x7	Passif	User 17	3.5	3.5	2.5	3.5	3.5	2.5	3	3.5	2
8	x8	Passif	User 1 bis	3	4	3	4	5	2	3	5	3
9	x9	Passif	User 2 bis	5	5	3	4	4	2	5	5	3
10	x10	Passif	User 3 bis	4	5	2	3	4	2	4	4	3
Moyenne				3.7	5.15	3.15	3	3.7	2.15	3.45	3.4	2.4
Ecart-type				1.316561177	1.22587837	1.764621458	1.130388331	1.512907429	0.883490552	1.165475582	1.329160136	0.875595036

Résultats du questionnaire groupe Expérimental				Directement après la séance d'endurance			Après la séance de récupération active			A la fin de séance de test		
N°	Utilisateurs	Récupération	N° Myotest	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être	Douleur musculaire	Fatigue musculaire	Bien-être
1	x1	EMS	User 1	4	5	4	2	2.5	2	2	4	3
2	x2	EMS	User 2	5	6	5	2	2	1	2	3	2
3	x3	EMS	User 3	5	5	2	2	2	2	3	4	3
4	x4	EMS	User 4	7	7	6	2	1	1	3	2	2
5	x5	EMS	User 7	6.5	6.5	3	3.5	3	2	2	2	1.5
6	x6	EMS	User 8	3	5	1	1.5	4	1	1.5	4	1
7	x7	EMS	User 9	5	6	3	2	3	1	2	3	2
8	x8	EMS	User 10	2	4	1.5	2	4	1.5	3	4.5	3
9	x9	EMS	User 11	6.5	7	2	4.5	4	1	4.5	4.5	1
10	x10	EMS	User 12	2.5	2	6	1	1	1	2	3	1
Moyenne				4.65	5.35	3.35	2.25	2.65	1.35	2.5	3.4	1.95
Ecart-type				1.748809119	1.528434202	1.826502426	1.006920498	1.155902726	0.474341649	0.881917104	0.936897955	0.831664997