

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS	3
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES GRAPHIQUES ET PHOTOS	8
INTRODUCTION GENERALE	9
PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	12
I. L'APPAREIL MUSCULAIRE	13
1. <i>PROCESSUS METABOLIAQUES DE L'EFFORT MUSCULAIRE.....</i>	13
2. <i>FILIERE ANAÉROBIE.....</i>	13
3. <i>FILIERE AÉROBIE.....</i>	16
4. <i>CONTRACTION MUSCULAIRE.....</i>	18
5. <i>ETIREMENT MUSCULAIRE</i>	22
II. CONTROLE NEUROMUSCULAIRE.....	23
1. <i>TYPOLOGIE DES FIBRES MUSCULAIRES.....</i>	23
2. <i>UNITES MOTRICES ET LOI DE HENNEMAN.....</i>	27
3. <i>MODULATION GENETIQUE DE LA TYPOLOGIE</i>	31
4. <i>CONTROLE PROPRIOCEPTIF</i>	31
5. <i>CONTROLE CORTICO-SPINALE.....</i>	36
III. ADAPTATION NEUROMUSCULAIRE A L'EFFORT	37
1. <i>DIFFÉRENCES ENTRE LES SPORTIFS</i>	38
2. <i>ADAPTATION A L'ENTRAINEMENT CHRONIQUE</i>	39
3. <i>MODIFICATIONS METABOLIQUES</i>	41
4. <i>TYPOLOGIE ET PERFORMANCE PHYSIQUE.....</i>	44
5. <i>ADAPTATION A L'ETIREMENT.....</i>	46
6. <i>PREDICTION DE LA PERFORMANCE D'APRES LA MYOTYPOLOGIE</i>	48

PARTIE 2 : ETUDES EXPLORATOIRES.....	50
I. MATERIEL ET METHODES.....	54
1. <i>ECHANTILLON</i>	54
2. <i>OUTILS ET VARIABLES MESUREES</i>	55
II. ETUDE 1 : TYPE DE PRATIQUE SPORTIVE ET NIVEAU D'EXITABILITE DES MOTONEURONES.....	59
1. <i>RESULTATS</i>	59
2. <i>DISCUSSION</i>	61
3. <i>CONCLUSION</i>	64
III. ETUDE 2 : SOLLICITATION EXCENTRIQUE ET NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES.....	64
1. <i>RESULTATS</i>	65
2. <i>DISCUSSION</i>	67
3. <i>CONCLUSION</i>	69
IV. ETUDE 3 : ENTRAINEMENT CHRONIQUE ET NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES.....	69
1. <i>RESULTATS</i>	70
2. <i>DISCUSSION</i>	77
3. <i>CONCLUSION</i>	79
V. DISCUSSION GENERALE.....	79
VI. CONCLUSION GENERALE.....	83
VII. PERSPECTIVES.....	84

Liste des abréviations

α MN Motoneurone alpha

1 RM Charge ne pouvant être soulevée qu'une seule fois

5HT La sérotonine

ACE Gène codant pour l'enzyme de conversion de l'angiotensine I en II (vasoconstructeur)

ACTN3 Gène de production d'alpha-actinin-3 qu'on retrouve dans les fibres IIA et IIB

AD Etirement actif dynamique

ANOVA Analysis of variance (Analyse de variance)

ADP Adénosine diphosphate

ATP Adénosine triphosphate

AcétylcoA Acétyl-coenzyme A (acide acétique activé)

CP Phosphocréatine

EMG Électromyographie

FNM Fuseau neuromusculaire

H Réflexe de Hoffmann

Hmax Amplitude maximale du réflexe de Hoffmann

I_{max} Intensité électrique de stimulation permettant d'obtenir une réponse mécanique maximale du groupe musculaire stimulé

I.e. Id est (c'est-à-dire)

IM Inhibition musculaire s'exerçant sur les motoneurones α

M Onde motrice M

ME Moelle épinière

Mmax Amplitude maximale de la réponse motrice M

OTG Organe tendineux de Golgi

POST Tests effectués après la fin de la saison d'entraînement

PRÉ Tests effectués avant le début de la saison d'entraînement

SA Etirement statique actif

SP Etirement statique passif

SN Système nerveux

SNC Système nerveux centra

TRH Thyrotropin-releasing hormone

Substance P Polypeptide ayant des fonctions de neurotransmetteur et de neuromodulateur

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différences entre les fibres musculaires.

Tableau 2 : Pourcentage des myotypes selon la spécialité sportive.

Tableau 3 : Moyennes des variables et comparaison multiple entre les quatre groupes de sportifs

Tableau 4 : Moyennes des variables des filles et des garçons et différences filles/garçons dans les 4 groupes de sportifs.

Tableau 5 : Moyennes des variables et comparaison multiple entre les moyennes avant et après étirement chez les deux groupes d'athlètes séparément

Tableau 6 : Comparaison des types d'étirement

Tableau 7 : Différences des moyennes des variables entre le début et la fin de la saison sportive et comparaison entre le groupe des sprinteurs et athlètes de demi-fond

Tableau 8 : Corrélation entre les paramètres électromyographiques et les variables physiques pour toutes les mesures effectuées avant et après la saison sportive chez les sprinteurs et athlètes de demi-fond

Tableau 9 : Différences des moyennes des variables entre filles (F) et garçons(G) au début et à la fin de la saison sportive et différences entre les moyennes au début et celles à la fin chez les filles d'une part et chez les garçons d'autre part dans leurs groupes respectifs

Liste des figures

Figure 1 : Voies énergétiques

Figure 2 : Evolution du VO₂ en fonction de l'intensité de l'effort.

Figure 3 : Voies énergétiques et types de fibres musculaires

Figure 5 : Intéraction Actine-Myosine.

Figure 6 : Cycle de la contraction.

Figure 7 : Modélisation du fonctionnement mécanique musculaire

Figure 8 : Role de la titine lors du travail excentrique

Figure 9 : Expérience de l'innervation croisée.

Figure 10 : L'unité motrice.

Figure 11 : Diamètres des fibres musculaires

Figure 12 : Types d'unités motrices

Figure 13 : Loi de Henneman

Figure 14 : Les récepteurs proprioceptifs

Figure 15 : Variation de la fréquence des potentiels d'action dans l'afférence Ib issue des organes tendineux de golgi.

Figure 16 : Innervation du fuseau neuromusculaire

Figure 17 : Le réflexe myotatique.

Figure 18 : Le réflexe myotatique inverse.

Figure 19 : Influences s'exerçant sur les pools de motoneurones α (MN α) et γ (MN γ) pour un muscle donné

Figure 20 : Courbe d'Howald

Figure 21 : Recrutement des fibres selon la charge de l'entraînement.

Figure 22 : Transformation des fibres selon Howald

Figure 23 : Relation entre le type de l'effort, l'intensité et la vitesse

Figure 24 : Multiplication des sarcomères.

Figure 25 : Exemple de réponses électromyographiques (EMG) du muscle soléaire d'un sujet à une stimulation du nerf tibial d'intensités variables.

Figure 26 : Tapis de Bosco : mesure des détente

Figure 27 : Dispositif de mesure de la force des jambes

Figure 28 : Inhibition présynaptique

Figure 29 : Onde F

Liste des photos et graphiques

Photos

Photo 1 : Positionnement de l'électrode intramusculaire et celles de surface

Graphiques

Graphique 1 : Valeurs individuelles de l'amplitude maximale de l'onde H du soléaire chez les 14 sportifs de chacun des quatre groupes de sportifs

Graphique 2 : Valeurs individuelles des rapports H_{max}/M_{max} du soléaire chez les 14 sportifs de chacun des quatre groupes de sportifs

Graphique 3 : Valeurs individuelles des rapports H_{max}/M_{max} (%) du soléaire chez les 14 sprinteurs/sauteurs (3a) et les 14 spécialistes en demi-fond/ fond (3b) (S : sprinteur/sauteur, E : fond/demi-fond, 1 : mesures au début de la saison sportive, 2 : mesures après une saison d'entraînement de 10 mois).

Graphique 4 : Valeurs individuelles des indices de puissances (4a, 4b) et de la force maximale (4c, 4d) du soléaire chez les 14 sprinteurs/sauteurs et les 14 spécialistes en demi-fond/ fond (S : sprinteur/sauteur, E : fond/demi-fond, 1 : mesures au début de la saison sportive, 2 : mesures après une saison d'entraînement de 10 mois).

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution des connaissances en biologie des activités physiques et sportives permet d'envisager depuis quelques années un abord méthodologique plus rationnel de l'évaluation de l'entraînement et du suivi de la performance athlétique : celui-ci consiste à associer les tests d'aptitudes physiques avec les techniques d'exploration fonctionnelle :

Les premiers, permettent de vérifier de façon sommaire la compatibilité des caractéristiques du sportif avec les exigences de l'activité sportive qu'il pratique, surtout sur le plan biométrique, cardiovasculaire et respiratoire.

Les seconds, visent à approfondir les connaissances concernant les répercussions de la pratique sportive sur les différents appareils de l'organisme surtout l'appareil musculaire. Ces connaissances ainsi acquises peuvent être fondamentales ou appliquées et contribueront au développement de la recherche scientifique, c'est-à-dire que les conséquences de leur découverte peuvent ne pas être immédiates ou évidentes, mais sont nécessaires au progrès des savoirs et techniques sportives, à l'entraînement, à la sécurité, à la santé et au bien-être du sportif.

Tous ces tests visent la détection, l'orientation et le suivi des sportifs. Ils permettent aussi de sélectionner ceux possédant des prédispositions et des qualités pour un sport donné et souhaitant le pratiquer à un très haut niveau. Ces épreuves de surveillance permettent aussi de suivre l'évolution des aptitudes physiques particulières spécifiques directement impliquées dans la performance d'un sport considéré, comme l'endurance, la force, la résistance ou autre....

Ces tests et épreuves sont nombreux et très variables selon qu'ils sont effectués par l'entraîneur sur terrain ou par le médecin au centre médical sportif, leurs résultats sont limités par les connaissances scientifiques, en particulier biomécaniques et physiologiques auxquelles elles se réfèrent. Il est nécessaire donc, de s'appuyer sur une batterie d'épreuves judicieusement choisies, car un seul test ne permet pas d'émettre un avis autorisé sur l'état de l'aptitude physique et ne doit pas faire oublier que le contexte de terrain prime toujours. L'entraîneur doit donc s'enquérir de l'entraînement suivi et

des réactions du sportif sur le terrain. Cela implique qu'il soit bien au courant des nouvelles techniques d'entraînement et de la nouvelle technologie du sport considéré.

La performance recherchée par les entraîneurs est atteinte par les sportifs réunissant trois groupes de qualité : Tactiques, techniques et physiques.

La connaissance de ces paramètres devrait permettre de bien approcher sur un plan scientifique le profil athlétique de l'entraîné. L'entraîneur doit donc, préciser le niveau de performance auquel le sportif peut aspirer. Il jugera si l'enjeu vaut les sacrifices consentis pour continuer de s'entraîner ou bien il est recommandé de se réorienter vers d'autres exigences physico-sportives. Cela implique :

- de détecter si les qualités physiques du sportif permettent de performer dans le sport choisi,
- de surveiller l'évolution de ses qualités en fonction de la progression des charges de l'entraînement.
- de vérifier que l'entraînement n'a pas de conséquences fâcheuses sur son organisme (fatigue, surentraînement, surmenage...).

En effet, l'exploration fonctionnelle des muscles (Electromyographie-EMG-) reste l'une des méthodes facilitant la mesure, le contrôle et le suivi des qualités neuromusculaires (surtout la composition en fibres musculaires) par le biais d'étude des variables réflexologiques.

C'est dans ce cadre que ce travail de thèse s'inscrit. Il essaye d'examiner les effets de l'entraînement sur les adaptations neuronales spinales par le biais de l'exploration fonctionnelle des réflexes (réflexe de Hoffmann (H) et l'onde motrice M) et d'analyser les performances physiques suite aux types de sollicitations musculaires aiguës et chroniques. Cette étude se propose de discuter l'hypothèse selon laquelle ces réponses réflexes explorées pourront être utilisées pour estimer l'excitabilité des motoneurons ainsi que la transmission synaptique spinale et prédire la myotypologie induite par la variabilité de l'effort physique (explosif, endurant, excentrique...). L'objectif est donc de fournir des informations de base concernant les effets du type d'entraînement sur la plasticité neuronale spinale.

Ce travail s'intéresse donc, à l'étude des effets de l'effort physique sur les adaptations neuromusculaires par le biais du réflexe de Hoffmann (H) et de l'onde motrice M : si l'étude de leurs amplitudes peut renseigner sur le degré d'excitabilité motoneuronale spinale et la nature de l'adaptation myotypologique selon le type d'effort physique ! Et si elle peut être utile dans le suivi des entraînements et de la performance sportive !

Pour cela, la première étude exploratoire de cette recherche s'intéresse à la comparaison de la réponse réflexe de Hoffmann (H) et de l'onde motrice M entre différents sportifs de disciplines différentes (athlétisme, football, nage). La deuxième cherche à analyser les effets de différents efforts excentriques (étirements) sur les adaptations motoneuronales immédiates et la transmission synaptique spinale. Enfin, la troisième compare les effets des entraînements chroniques sur cette plasticité synaptique chez différents athlètes (sprinteurs et endurants).

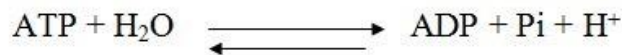
Ce manuscrit de thèse se divise donc, en deux parties. La première, qui fait suite à cette introduction générale, expose l'état des connaissances actuellement disponibles sur l'appareil musculaire et ses processus de transformation de l'énergie métabolique (**Chapitre 1**), les bases moléculaires de l'effort et les mécanismes de la contraction et de l'étirement (**Chapitre 2**), la myotypologie et les différentes unités motrices (**Chapitre 3**), les adaptations neuromusculaires à l'entraînement sportif (**Chapitre 4**). Enfin, la seconde partie présente les résultats expérimentaux des trois études exploratoires en trois chapitres et les éléments de discussion qui en découlent. Une conclusion générale clôt ce travail, résumant nos principaux résultats et soulignant les différentes perspectives envisagées.

PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

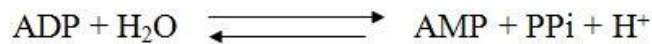
I. L'APPAREIL MUSCULAIRE

1. PROCESSUS METABOLIAQUES DE L'EFFORT MUSCULAIRE

La contraction musculaire et la mise sous tension du muscle sont dues au glissement des filaments d'actine le long des filaments de myosine, avec constitution entre ces deux molécules de liaisons (ponts), l'énergie étant fournie par l'hydrolyse de l'ATP grâce à l'enzyme ATPase selon la réaction :



P_i = orthophosphate; PP_i = pyrophosphate



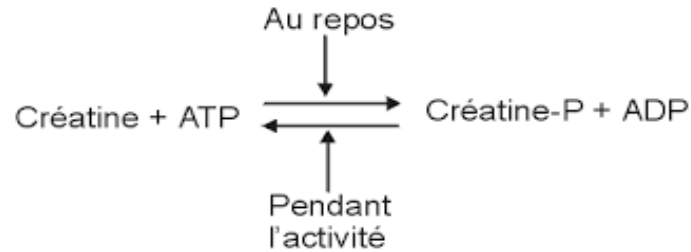
Deux processus interviennent pour reconstituer les molécules d'ATP nécessaires à la contraction musculaire :

Le premier est anaérobie, son origine est strictement sarcoplasmique. Il a deux composantes : La première à partir de la créatine-phosphate (mécanisme anaérobie alactique), la deuxième à partir de la glycolyse anaérobie avec production d'acide lactique (mécanisme anaérobie lactique).

Le deuxième processus est aérobie. Il reflète l'aptitude des sujets à utiliser l'oxygène pour dégrader complètement les hydrocarbures (glucides et lipides). Chaque processus est caractérisé par sa puissance (quantité maximale d'énergie fournie par unité de temps) et sa capacité (quantité totale d'énergie fournie sans tenir compte du temps).

2. FILIERE ANAÉROBIE

La CP est la source énergétique de la filière anaérobie alactique, c'est une molécule présente dans le muscle en petite quantité (faible capacité). Elle assure la reconstitution d'une quantité équimoléculaire d'ATP en présence d'ADP.



La CP permet donc, des efforts de grandes puissances et de très courtes durées (quelques secondes).

Sa quantité n'est pas modifiée par l'entraînement, en effet il a été mesuré des concentrations musculaires de même valeur chez des sprinters et des coureurs de fond. Il ne semble donc pas exister de relation nette entre l'aptitude au sprint et les réserves de CP. En revanche, l'aptitude qui consiste à épuiser les stocks de CP serait entraînable (P.Talbot et coll, 1991).

La CP n'est synthétisée que lorsqu'il existe un excès d'ATP, c'est à dire lorsque le sujet est au repos (récupération) ou à une faible charge d'effort.

Ce système anaérobie alactique est mis en jeu essentiellement lors d'efforts violents et brefs. Le facteur limitant est l'épuisement du stock de créatine phosphate.

Cependant, la glycolyse anaérobie est le mécanisme énergétique de la filière anaérobie lactique, c'est la dégradation du glucose en pyruvate, pour former du lactate. Ce mécanisme catabolique lui faut plusieurs secondes (25s à 30s) pour atteindre son débit maximal d'énergie, il ne peut pas permettre d'assurer des débits d'énergie aussi élevés que ceux assurés par la dégradation du PC et sa capacité est de l'ordre de 300 J/kg chez l'individu sédentaire, sans doute au moins le double chez l'athlète spécialisé dans le sprint long ou le demi-fond (Talbot P et coll, 1991).

Le nombre des réactions qui conduisent du glucose à l'acide lactique (figure 1) est important mais leur vitesse jusqu'au pyruvate est très rapide. Ces réactions se déroulent dans le sarcoplasme. Elles ont lieu en deux temps : phosphorylations du glucose puis dégradation proprement dite.

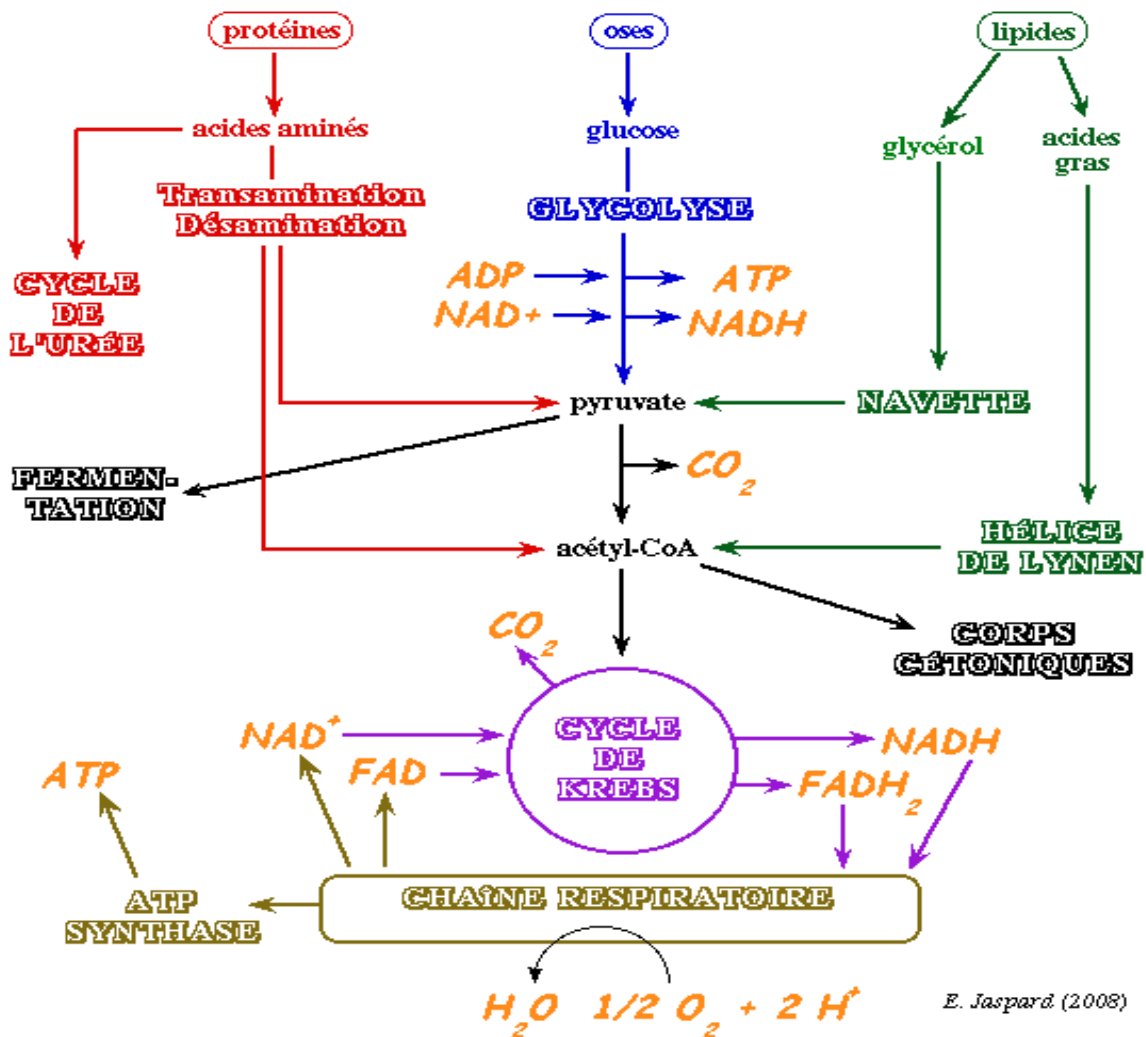


Figure 1 : voies énergétiques. Source : cours biochime.univ-angers

L'intensité de la glycogénolyse est contrôlée par le rapport des concentrations ATP/ADP dont la baisse active les phosphorylases et la glycogénolyse. Les catécholamines, et particulièrement l'adrénaline, contribuent au déplacement de cet équilibre dans le même sens.

L'augmentation de la concentration des lactates est la preuve de la sollicitation importante de la filière anaérobie lactique, qui est associée à une acidose importante qui induit des sensations d'effort importantes. Il faut donc un certain degré d'entraînement et de performance pour être capable d'atteindre des concentrations importantes d'acide lactique (Bertrand B, 2011).

3. FILIERE AÉROBIE

C'est un système qui n'atteint son débit maximal d'énergie qu'après quelques minutes (environ 3 à 4 mn) puisqu'il est inférieur à celui des mécanismes anaérobies (2 à 4 fois). Il nécessite la présence d'oxygène, indispensable aux réactions oxydatives liées à la chaîne respiratoire mitochondriale.

Lorsque la puissance augmente, l'exercice est perçu comme de plus en plus difficile ; à partir d'une puissance caractéristique de chaque individu, la consommation d'oxygène (VO_2) plafonne. Le niveau auquel VO_2 se stabilise est appelé consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) (figure 2).

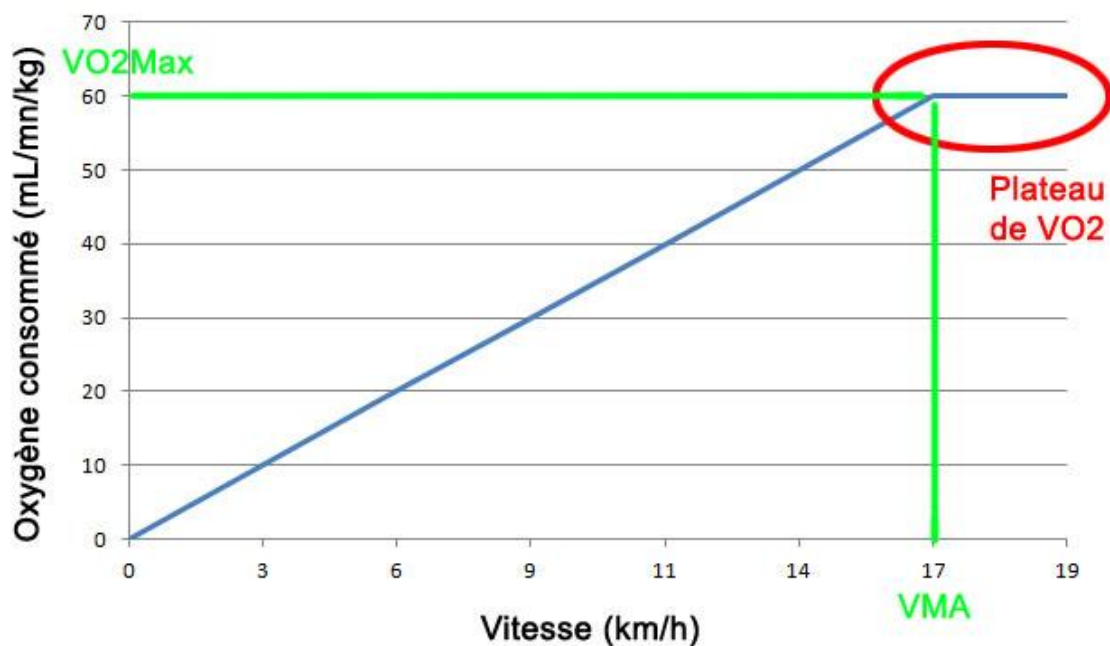


Figure 2 : Evolution du VO_2 en fonction de l'intensité de l'effort.
Source :<https://www.montre-cardio-gps.fr>

Dans cette voie aérobie, le glucose est transformé en acétylcoenzyme A (Acetyl CoA) qui, grâce aux réactions du cycle de Krebs aboutit à la fabrication de plus d'ATP que la voie anaérobie (figure 1).

Pour un exercice de longue durée, la différence entre les sportifs entraînés et les non sportifs repose non seulement sur la différence entre leurs valeurs de (VO_2 max), mais sur le pourcentage de VO_2 max qu'ils peuvent soutenir.

L'aptitude à soutenir un pourcentage élevé de VO₂max est fonction de l'entraînement d'endurance. Elle traduit l'aptitude à maintenir son volume plasmatique au plus haut possible malgré les pertes hydriques et l'aptitude à tirer une part importante de son énergie de l'oxydation des hydrocarbures glucides et lipides. Elle semble être associée à une élévation du seuil d'accumulation des lactates sanguins. Et plus l'intensité de l'effort physique est faible, moins la resynthèse d'ATP provient des glucides et au plus elle provient des lipides (figure 1).

Cependant si la capacité de production de cette filière est très importante en présence d'O₂, sa mise en route est relativement lente, elle nécessite en effet que l'ATP produit passe de la mitochondrie dans le sarcoplasme pour atteindre les myofibrilles mais aussi que les substrats et l'O₂ nécessaires à sa production soient transférés du sarcoplasme dans la mitochondrie pour entrer en cycle de Krebs et même pour certains d'entre eux dans un premier temps du sang circulant dans le sarcoplasme. (R.Thomas, 1989).

En effet, le choix de la filière dans la fibre musculaire qui a besoin d'énergie est possible grâce à l'existence de trois types de cellules musculaires dont chacune est adaptée à un type de mécanisme de régulation métabolique. Le fonctionnement de leurs enzymes peut être freiné ou accéléré en fonction du type d'exercice et du type métabolique dominant et en fonction de la quantité d'ATP ou d'ADP, de NAD ou de NADH (Bertrand B, 2011).

Si l'exercice est d'endurance, il y a sollicitation des cellules type I (figure 3) : peu d'ATP est consommée. Le rapport ATP/ADP est donc élevé. Cela freine les enzymes de la glycolyse qui va donc fonctionner à faible régime. Il y aura donc peu de pyruvates formés qui pourront quasiment tous rentrer dans la mitochondrie, ce qui enclenchera la voie aérobie avec ses caractéristiques de puissance faible et de capacité élevée (Bertrand B, 2011).

Si l'exercice est puissant, il y a sollicitation des cellules type II (figure 3) : Beaucoup d'ATP est consommé. Le rapport ATP/ADP est donc faible. Cela stimule les enzymes de la glycolyse qui va donc fonctionner à grand régime. Il y aura plus de pyruvates formés. Ils ne pourront pas tous rentrer dans la mitochondrie, et se transformeront en acide lactique. C'est la voie anaérobie lactique avec ses caractéristiques de puissance élevée et de capacité faible.

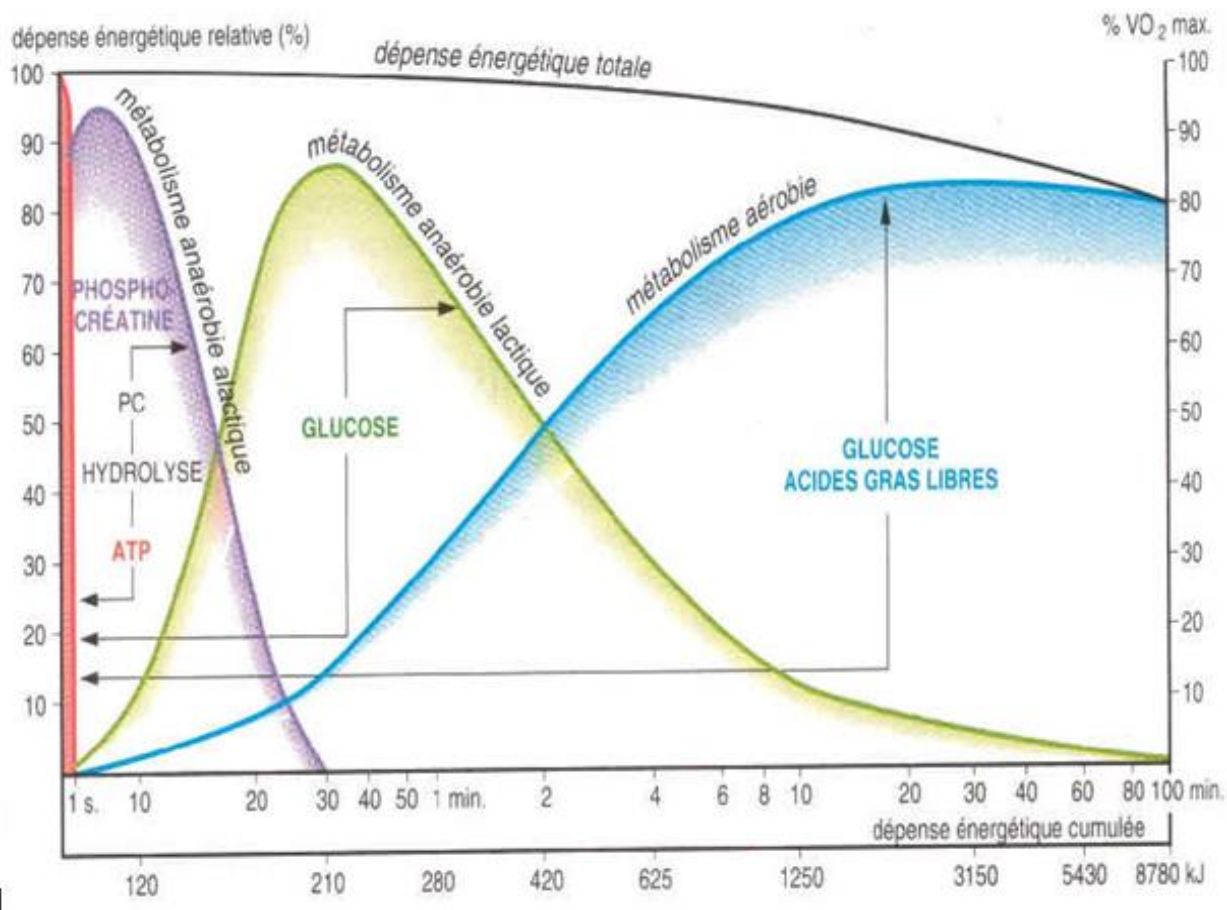


Figure 3 : Voies énergétiques et Régénération d'ATP. Source :<https://www.montre-cardio-gps.fr>

4. CONTRACTION MUSCULAIRE

Toutes les cellules musculaires sont formées d'unités contractiles (les myofibrilles), qui transforment l'énergie potentielle chimique (ATP), en mouvement, c'est-à-dire en énergie mécanique. Chaque myofibrille contient deux types de filaments protéiques, des filaments fins (actine) et de filaments épais (myosine) qui s'imbriquent les uns dans les autres et établissent entre eux, grâce à l'ATP et en présence de calcium des liaisons dont le nombre dépend des sites de fixation disponibles et donc de l'intensité de l'étirement ou de la contraction.

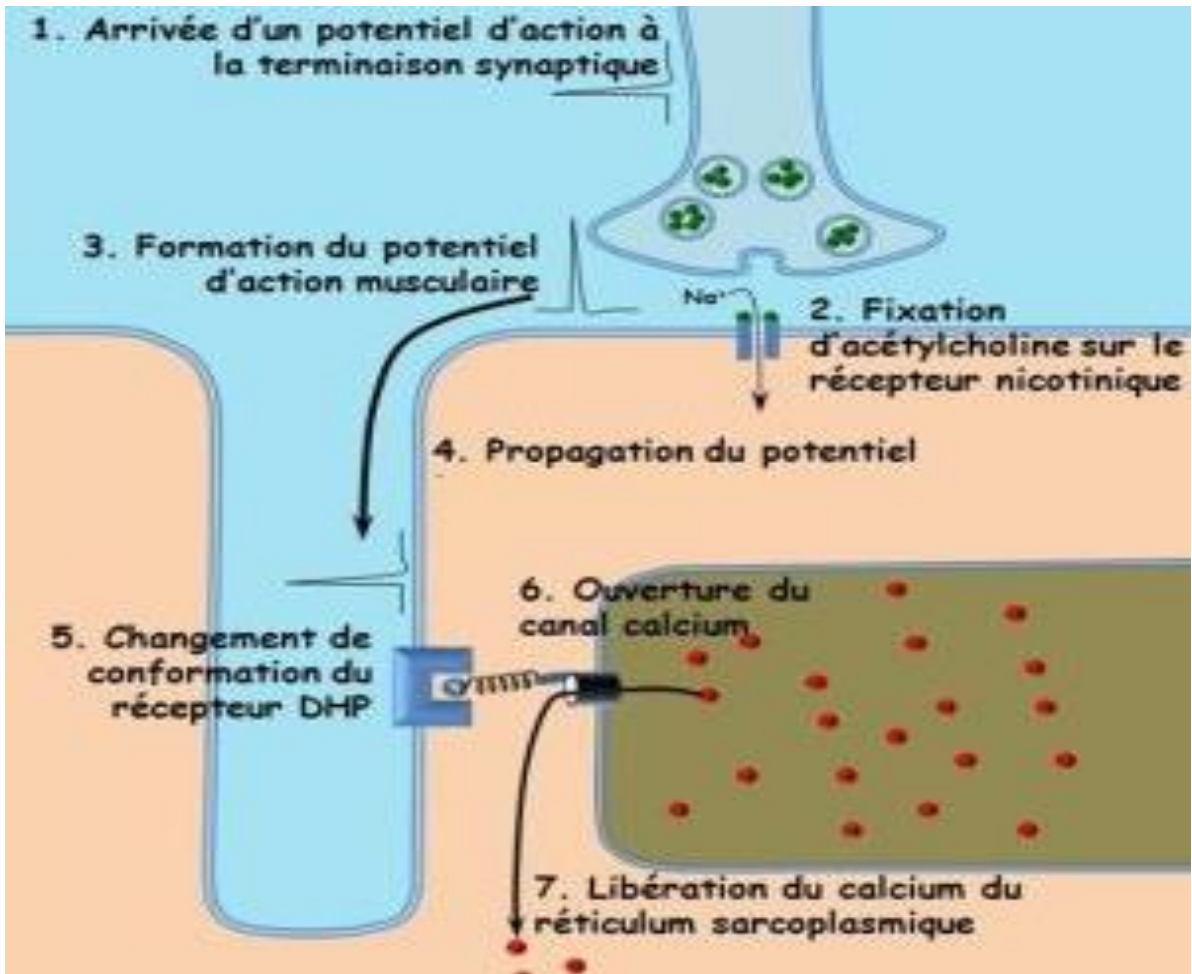


Figure 4 :Couplage-Excitation-Contraction. Source :<https://sportifetaviron.fr>

C'est l'influx nerveux qui est le stimulus physiologique de la contraction musculaire. Il se propage jusqu'à la connexion synaptique neuro-musculaire ; à ce niveau, il déclenche la libération de l'acétylcholine et l'apparition d'un potentiel de plaque qui déclenche un potentiel d'action musculaire, celui-ci se propage le long du sarcolemme pour permettre la libération du calcium vers les myofilaments pour permettre la contraction (figure 4).

On distingue deux étapes dans ce couplage excitation-contraction : Le potentiel d'action provoque une libération des ions Ca^{++} dans le sarcoplasme qui se fixent sur la molécule de troponine pour permettre le déplacement de la molécule de tropomyosine. Ce déplacement de de tropomyosine dégage le site de reconnaissance de la myosine, site qui était masqué au repos (figure 5). La formation des ponts actine-myosine par combinaison de la tête

de myosine avec les molécules d'actine, devient alors possible, entraînant l'ensemble des phénomènes de la contraction musculaire.

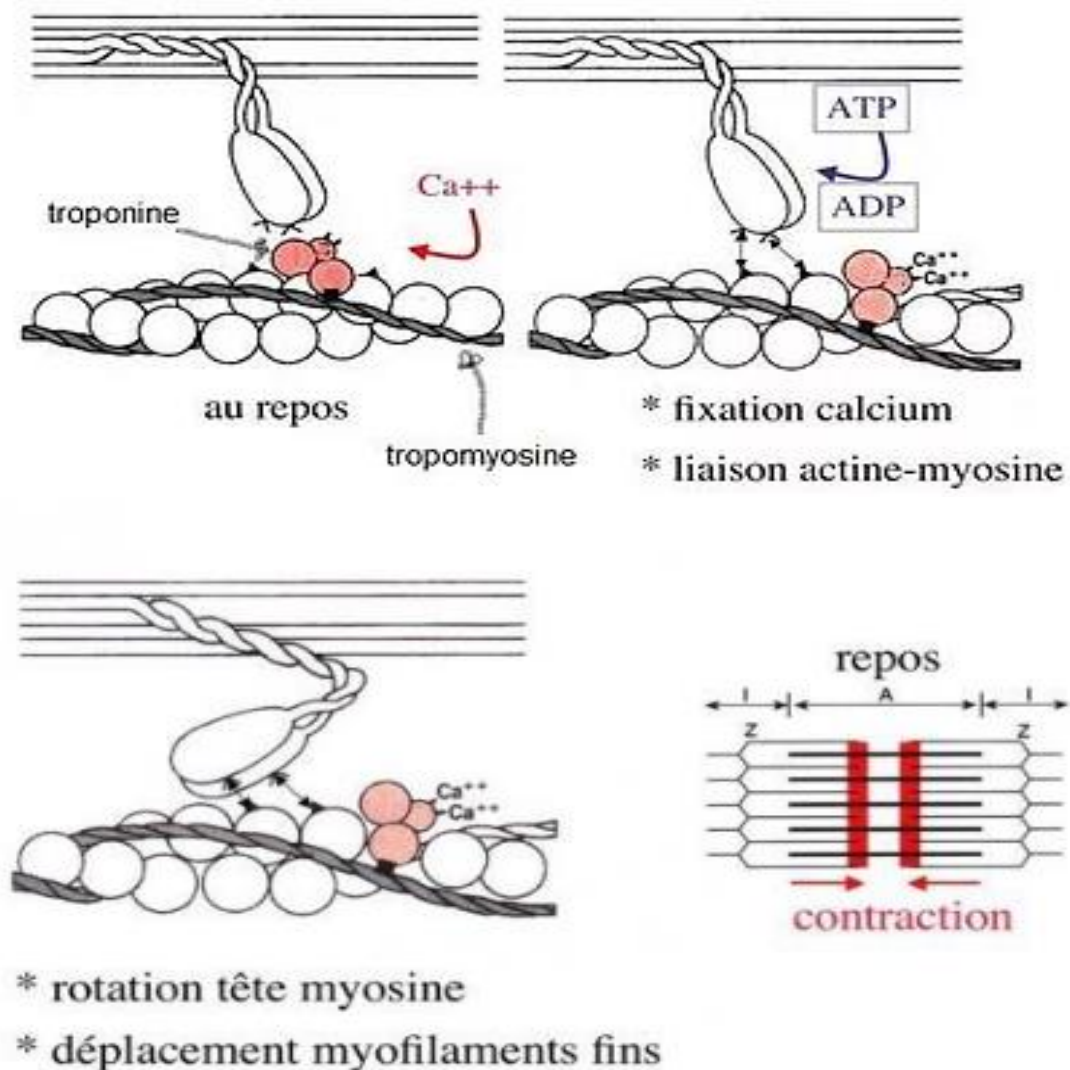


Figure 5 : Interaction Actine-Myosine. Source : <http://tpe1erebfl.wixsite.com>

La contraction musculaire résulte donc d'un glissement des actines entre les filaments de myosines. Ce glissement provoque une diminution de la longueur du disque sarcomère. Ce mouvement se produisant au niveau de chaque sarcomère provoque le rapprochement des deux extrémités de la fibre.

Ce sont les ponts entre actines et myosines qui permettent le glissement. Au moment de la contraction la tête de la molécule de myosine se projette vers le filament d'actine où elle se fixe. Ensuite la tête de myosine pivote et entraîne le filament d'actine vers la partie centrale du sarcomère, puis se détache et retrouve sa position initiale (figure 6).

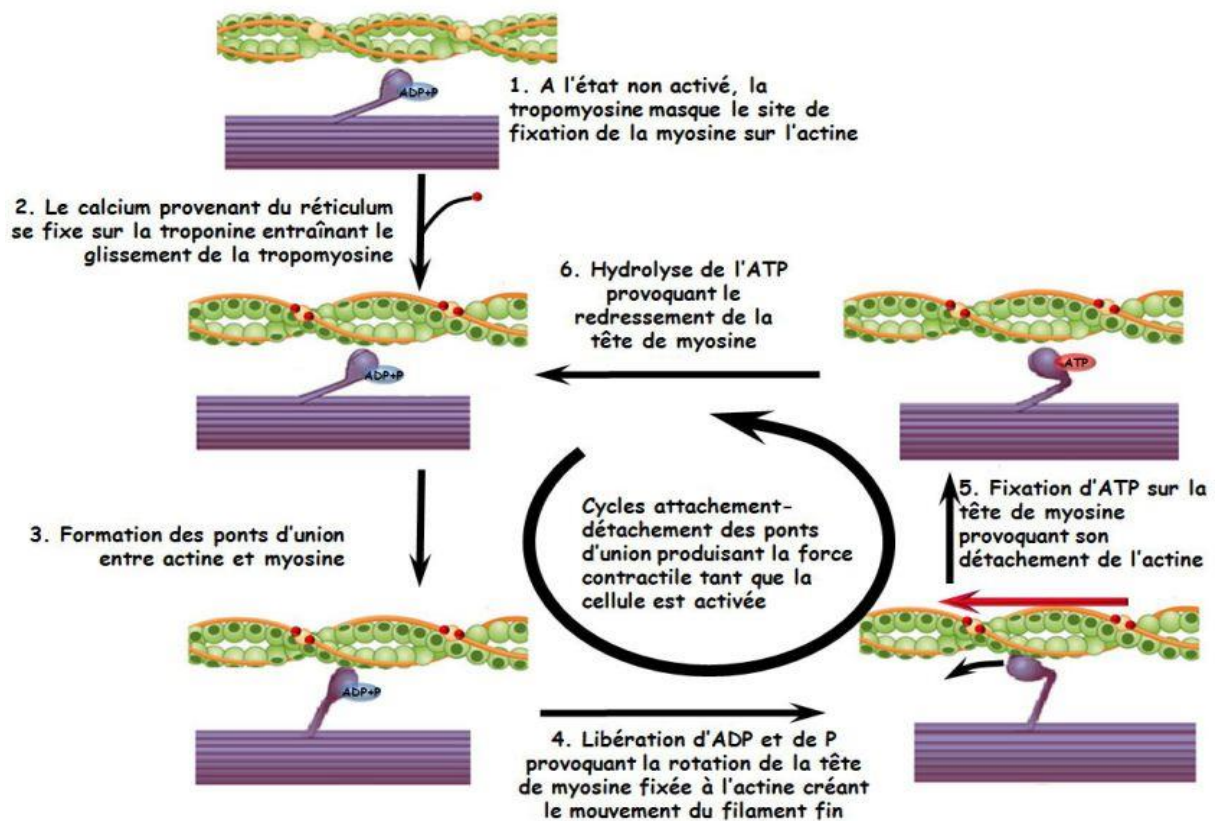


Figure 6 : Cycle de la contraction, source : <http://ressources.unisciel.fr>

La répétition un grand nombre de fois de ce mouvement élémentaire permet d'expliquer les variations de longueur du sarcomère.

Lorsque le glissement est complet, l'ATP entre alors en contact avec la myosine qui l'hydrolyse (site ATPasique) et rompt la liaison : Cette rupture est immédiatement suivie d'un redressement du pont de liaison qui se fixera sur le site suivant. Le glissement peut ainsi se poursuivre tant qu'il persiste du Calcium, que l'approvisionnement en ATP s'effectue correctement et qu'il existe des sites de fixation en face. L'acto-myosine possède donc une activité ATPasique très importante localisée dans la tête de la myosine. Au repos cette activité est inhibée par la troponine et la tropomyosine; cette inhibition est levée par les ions Calcium. Chaque fois qu'un pont se forme entre l'actine et la myosine une molécule d'ATP est hydrolysée : ceci entraîne une modification de la configuration de la tête de myosine et la bascule de celle-ci.

La re-synthèse de l'ATP est nécessaire à la rupture du pont entre actine et myosine (J.C.Chatard, 1991).

Le relâchement du muscle survient lors de la repolarisation de la membrane du réticulum endoplasmique, ce qui permet le captage des ions Ca^{++} entraînant la dissociation du complexe Troponine- Ca^{++} ; la tropomyosine reprend sa place initiale masquant le site de liaison entre actine et myosine et la tête de myosine se détache de l'actine.

5. ETIREMENT MUSCULAIRE

(Morgan et Allen, 1999) ont suggéré qu'avec l'allongement, un détachement "forcé" des têtes de myosine a lieu sans hydrolyse d'ATP et pour des allongements lents, une proportion de ponts va encore pouvoir réaliser tout le cycle d'attachement-détachement de la tête de myosine malgré ce détachement forcé. Cependant, avec des allongements rapides, moins de ponts vont pouvoir compléter le cycle et une proportion de ponts restera en position mécaniquement défavorable, ce qui permet au muscle de développer une tension passive essentiellement due aux éléments élastiques regroupant le tissu conjonctif (parallèle et en série), les tendons et les ponts des myofibrilles (figure 7).

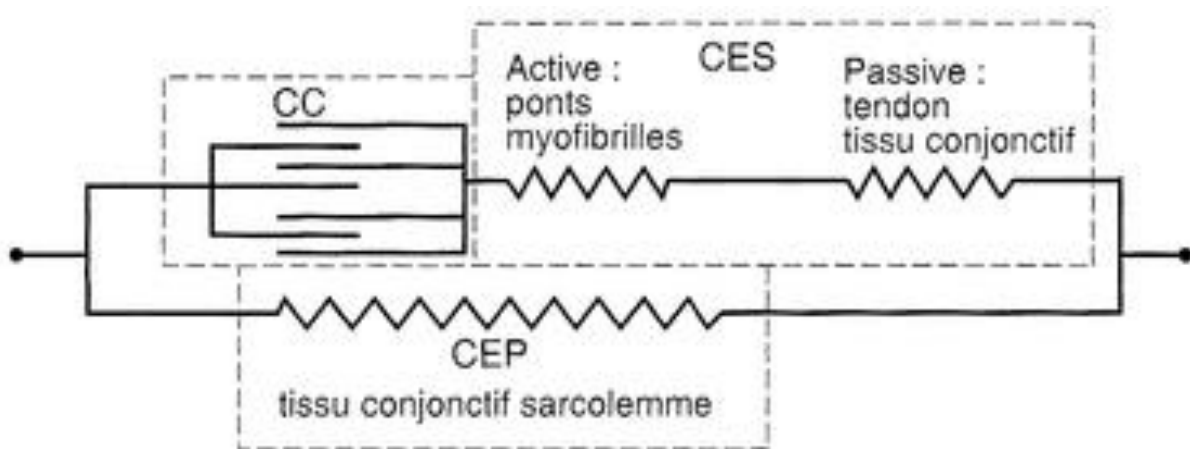


Figure 7 : Modélisation du fonctionnement mécanique musculaire. (Modèle de Hill modifié par Shorten (1987)) Source : F. Goubel et G. Lenseil-Corbeil. Biomécanique : Eléments de mécanique musculaire. Ed.Masson 2003

Les recherches ont montré que la molécule de titine (figure 8) est considérée comme la protéine jouant le plus grand rôle dans l'étirement. Elle lie la myosine à la strie Z et ramène le

sarcomère dans sa position initiale à la suite d'un mouvement d'allongement. Elle maintient aussi le bon alignement de la myosine par rapport à l'actine.

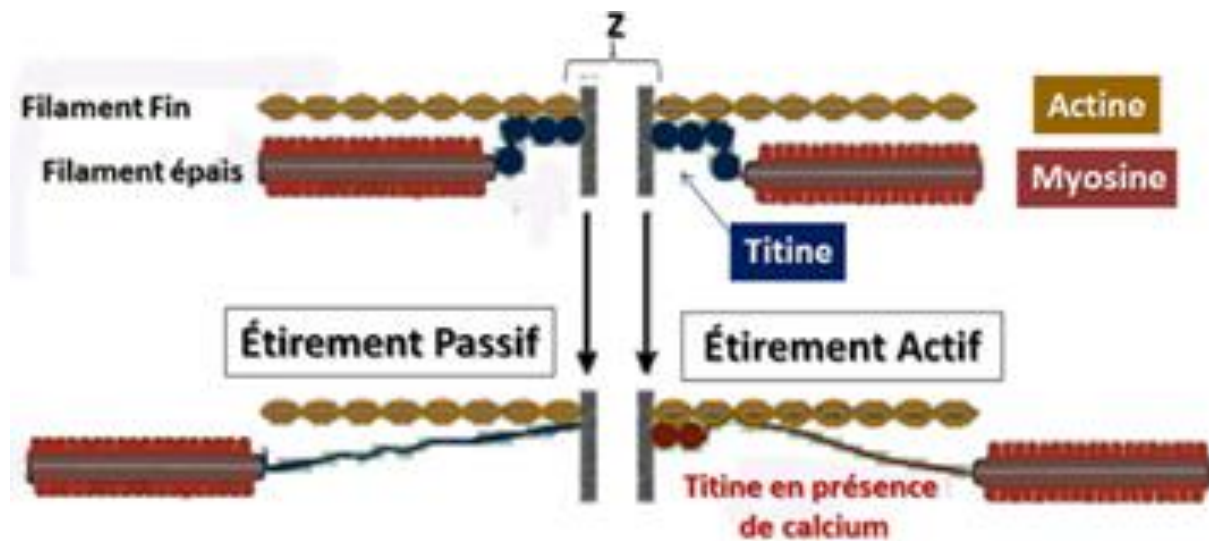


Figure 8: Role de la titine lors du travail excentrique. Selon Herzog et al. *Frontiers in Physiol.* Source : *Physiologie et médecine expérimentale du cœur et du muscle.* 2015,6,174. (Myosine, Titine). Jacques MERCIER et Sylvain RICHARD, Université de Montpellier, PhyMedExp, INSERM U1046, CNRS UMR9214

A côté de ces éléments élastiques, la réponse aigüe aux étirements a été attribuée aussi aux facteurs neurologiques. En effet, le but de l'étirement est d'inhiber l'activité du réflexe myotatique (voir réflexe myotatique) (Guissard N, 2004), ce qui réduit la résistance et donc augmenter l'amplitude du mouvement.

II. CONTROLE NEUROMUSCULAIRE

Le muscle est l'effecteur final de l'effort physique, formé par différents types de fibres recevant chacune une innervation spécifique. Il possède un système sensoriel ajusté et régulé en permanence par le système nerveux central qui est destiné à contrôler son état de force de vitesse et de longueur par l'intermédiaire de capteurs spécialisés.

1. TYPOLOGIE DES FIBRES MUSCULAIRES

A ce jour, les méthodes les plus utilisées en matière de détermination des profils spécifiques d'isoformes de myosine et plus particulièrement de chaînes lourdes de myosine

(MyHC : Myosin Heavy Chains) ont permis de subdiviser les fibres en plusieurs sous-types, dont trois principaux : I, IIA et IIB ainsi que plusieurs intermédiaires : IC, IIC, IIAC et IIAB (tableau 1, figure 11). Il faut noter néanmoins que cette méthode basée sur l'activité enzymatique globale des fibres analysées ne permet pas de se prononcer de manière précise sur leur contenu en protéines contractiles spécifiques.

L'électrophorèse d'extraits musculaires permet de séparer les différentes isoformes de protéines musculaires en fonction de leur taille. Le site de l'activité ATPase se trouvant sur la partie globulaire de la chaîne lourde de myosine, le lien entre activité ATPase et isoformes de MyHC isolées par électrophorèse a abouti, par analogie de nomenclature, à la définition des isoformes MyHC Ib/s (b dans le muscle cardiaque, s dans le muscle lent slow), ainsi que MyHC Iia et Iib 7 et plus tardivement MyHC Iid/x (isolée indépendamment dans différentes espèces, d'où cette nomenclature chargée)(Shiaffino S 1989), qui constituent les isoformes majeures du muscle strié squelettique adulte. Les types de fibres intermédiaires, définis par activité ATPase, correspondent à des fibres exprimant des mélanges de ces isoformes (Scott W 2001). Il est à noter cependant qu'une variabilité entre espèces existe et que chez l'homme, la présence de l'isoforme MyHC Iib n'a pas été mise en évidence à ce jour bien que le gène soit présent dans le génome humain. Les fibres marquées comme type IIB de par leur activité ATPase contiennent donc en fait l'isoforme MyHC Iid/x (Smerdu V 1994). De plus, d'autres isoformes (embryonnaire, néonatale, extraoculaire) existent et sont exprimées transitoirement durant le développement et la régénération musculaire ainsi que dans certains muscles spécifiques (Weiss A 1999). De par sa nature quantitative ainsi que par les relations connues entre : 1) isoforme de myosine ; 2) vitesse de contraction (MyHC I | MyHC Iia | MyHC Iid/x) et 3) taux d'hydrolyse de l'ATP, l'identification des isoformes de MyHC par électrophorèse de fibres isolées représente probablement la meilleure méthode en matière de délimitation de fibres musculaires dans le domaine de la recherche fondamentale.

Comme toutes les protéines, la myosine est synthétisée d'après l'information génétique apportée par les ARN messagers, eux-mêmes provenant de la transcription de l'ADN nucléaire. La séquence des acides aminés de la myosine est donc parfaitement déterminée par le code génétique et les gènes codant pour les chaînes de la myosine et l'actine sont identifiés chez la souris et l'homme (Buckingham 1989, 1992).

Le déterminisme de la typologie musculaire comporte donc inévitablement une composante génétique mais l'expression des gènes est soumise à une régulation complexe qui

intègre de multiples facteurs endogènes et exogènes tels que l'innervation, le sexe, l'âge et l'état d'entraînement (Periasamy et al 1989).

A l'intérieur d'une fibre (longue de plusieurs dizaines de cm) qui comprend des centaines de noyaux cellulaires, il semble que l'expression des gènes soit dépendante de la répartition spatiale des noyaux dans la fibre (Klarsfeld 1991). Ainsi, les noyaux situés sous la plaque motrice auraient un rôle régulateur prépondérant par rapport aux noyaux secondaires placés le long de la fibre.

Chez l'homme, plusieurs études ont montré une plus grande ressemblance de la typologie musculaire entre des vrais jumeaux (homozygotes) qu'entre des faux jumeaux (hétérozygotes) ou frères et soeurs (Komi et al 1973, 1977, Prudhomme et al 1984, Simoneau et al 1986). Les facteurs génétiques ont surtout une influence sur la proportion de fibres lentes/rapides alors que la proportion de fibres rapides IIA/IIB est davantage soumise à des facteurs extra-génétiques tels que l'âge, le sexe et l'entraînement.

Il est possible de différencier les fibres lentes des fibres rapides au moyen de tests quantifiant les activités d'enzymes reliées au métabolisme oxydatif (fibres de type I) ou glycolytique (fibres de type II). Par analogie avec la méthode de classification au moyen de l'activité ATPase des MyHC, de nombreux efforts ont été déployés pour tenter de déterminer des sous-types de fibres en termes métaboliques. Une classification restreinte, pratique, permet de distinguer : 1) des fibres lentes oxydatives (SO pour Slow twitch Oxydative) ; 2) des fibres rapides oxydatives et glycolytiques (FOG pour Fast twitch Oxydative Glycolytic), ainsi que 3) des fibres rapides glycolytiques (FG pour Fast Glycolytic), ces dernières étant les plus rapides (Pette D, 1997). Chez l'homme, trois types de fibres « pures » ne présentant qu'une seule isoforme de MyHC peuvent être isolés : les fibres de type I (MyHC Ib/s), IIA (MyHC Iia) et IID/X (MyHC IId/x). Il est néanmoins fréquent de trouver des fibres mixtes exprimant plusieurs isoformes rapides alors qu'il est extrêmement rare de détecter la coexistence d'isoformes rapides et lentes (Bottinelli R 1994). Il en a été déduit que les fibres mixtes représentent des formes intermédiaires lors du processus de transition (Leeuw T, 1996). Il a également été proposé que ces fibres hybrides représentent une sous-population capable de s'adapter rapidement aux changements fonctionnels (Baldwin KM, 2001).

Le passage des isoformes rapides à l'isoforme lente est plus rapide et plus complet chez le lapin que chez le rat (Delp MD, 1994). De plus, l'étendue des changements d'isoformes est corrélée à la composition originale du muscle étudié ainsi qu'à la durée de la

stimulation (Jaschinski F, 1998), démontrant l'existence d'une relation dose-réponse. Les changements d'isoformes de protéines contractiles obtenus par exercice musculaire volontaire (endurance) vont dans le même sens que ceux obtenus par stimulation électrique. En comparaison avec la quantité d'informations concernant les transitions d'isoformes rapides à lentes, la transition inverse est nettement moins bien représentée dans la littérature. Néanmoins, le même principe de changements séquentiels selon la vitesse de contraction s'applique. Plusieurs interventions induisent la transition de fibres musculaire lentes vers un phénotype plus rapide.

Tableau 1 : Différences entre les fibres musculaires. Auteur anonyme,

	FIBRES I slow oxydative	FIBRES IIa fast oxydative glycolitic	FIBRES IIb fast glycolitic
Vitesse de contraction	lente	moyenne	rapide
Force développée	+	++	+++
Fatigabilité	+	++	+++
Synthèse de l'ATP	aérobie	mixte	anaérobie
Nombre de mitochondries	+++	++	+
Myoglobine	+++	++	+
Réserve en glycogène	++	++	+
Réserve en triglycérides	+++	++	+
Activité de la myosine ATPase	lente	rapide	rapide
Type d'activité préférentielle	posture endurance	marche sprint	mvt puissants ou intenses courte durée

Les fibres musculaires à secousse rapide disposent d'une grande capacité de transmission des potentiels d'action, présentent un haut niveau d'activité ATPasique. C'est grâce aux métabolismes anaérobies que ces fibres à secousse rapide obtiennent leur énergie. Elles sont donc utilisées au cours d'exercices intenses et puissants. Les propriétés métaboliques et contractiles de ces fibres conviennent bien aux sports à grandes charges en puissance et explosivité.

Les fibres à secousses lentes produisent de l'énergie par la voie de la filière aérobie. Elles présentent un bas niveau d'activité ATPasique et une faible vitesse de contraction. Leur capacité glycolytique est inférieure à celle des fibres rapides. Elles contiennent de nombreuses mitochondries et résistent à la fatigue. Elles sont bien adaptées au travail aérobie soutenu et prolongé (W. McArdle et coll, 2001).

Les capacités biomécaniques et physiologiques du muscle dépendent en partie des influx nerveux envoyés par les motoneurones α . Les expériences d'innervation croisée entre un muscle lent et un muscle rapide ont montré que l'activité du motoneurone commandait et déterminait le phénotype musculaire (figure 9). Les axones moteurs sont responsables de la différenciation du muscle et de sa vitesse de contraction (Buller et al. 1960).

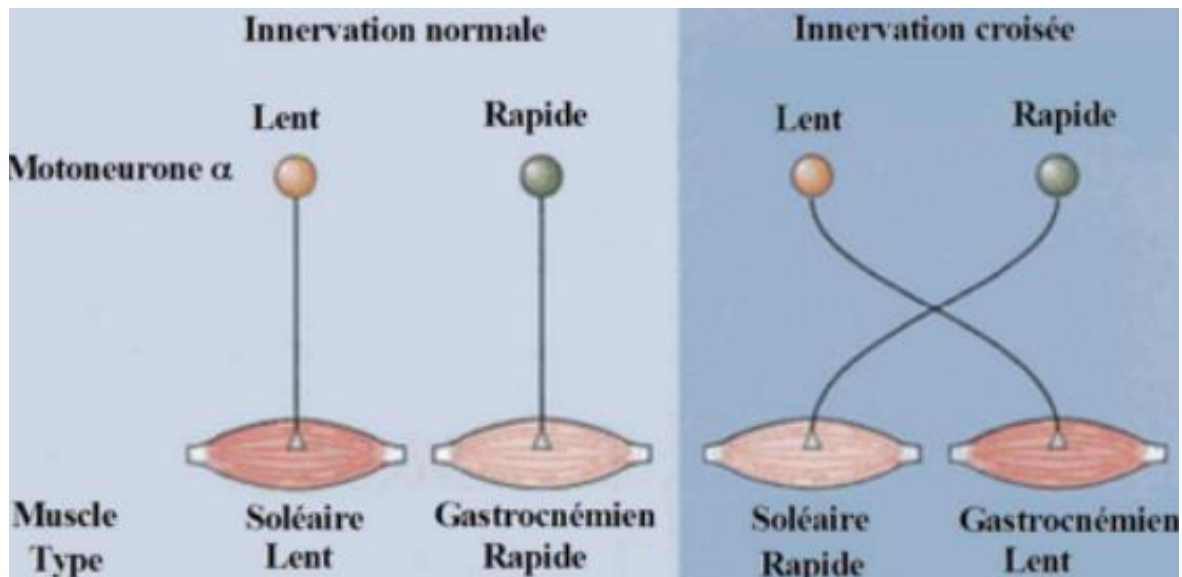


Figure 9 : Expérience de l'innervation croisée. Source : UE2 Histologie Professeur Onolfo 12/12/17 Roneotypeuse: Yasmine Allanic Roneoficheur: Victor Percheron

2. UNITES MOTRICES ET LOI DE HENNEMAN

Le concept d'unité motrice (figure 10) a été proposé par Sherrington. Il définit toutes les fibres musculaires qui sont innervées par la même fibre nerveuse motrice (motoneurone). Le territoire d'une unité motrice peut s'étaler sur plus de la moitié du muscle.

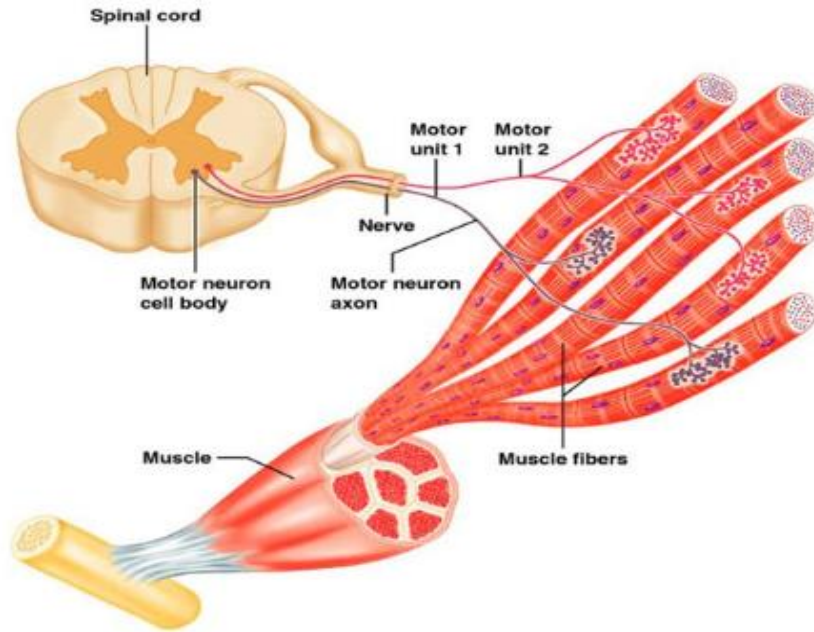


Figure 10 : L'unité motrice. Source : <https://slideplayer.fr>. Publié par Donatien Chollet

Chaque motoneurone innerve un ensemble de fibres musculaires ayant les mêmes caractéristiques physicochimiques et qui forment l'unité motrice. Il existe une relation entre le diamètre de l'axone et la taille et le type des fibres innervées, les axones innervant les fibres lentes ont un diamètre plus petit que ceux qui innervent les fibres rapides (figure 11).

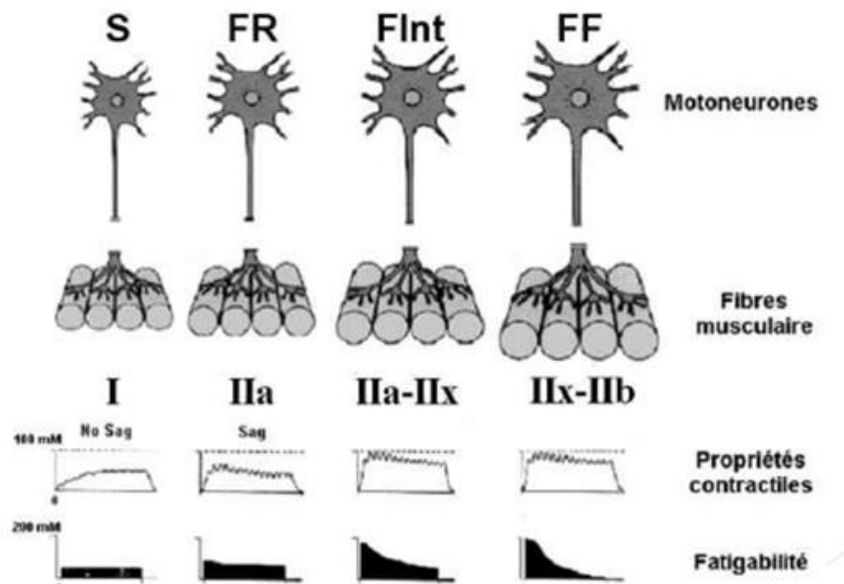


Figure 11 : Diamètres des fibres musculaires (lentes (S), rapides résistantes à la fatigue (FR), rapide intermédiaires (FInt) et rapides fatigables (FF)) par rapport aux tailles des fibres nerveuses. Source : <http://prevost.pascal.free.fr>

Comme pour la typologie des cellules musculaires, on distingue donc, trois types d'unités motrices : les unités caractérisées par la rapidité de leur contraction, leur tension tétanique élevée, leurs vitesses de conduction axonales élevées et leur faible résistance à la fatigue (FF : fast-fatigable); les unités caractérisées par la lenteur de leur contraction, leur tension tétanique faible, leurs vitesses de conduction axonale basses et leur très grande résistance à la fatigue (S : slow); et celles qui ont une rapidité de contraction et distribution des vitesses axonales identiques à celles des fibres (FF), une résistance élevée à la fatigue comme le type S, mais une tension tétanique intermédiaires entre les deux premières (FR : fast-resistant) (figure 12).

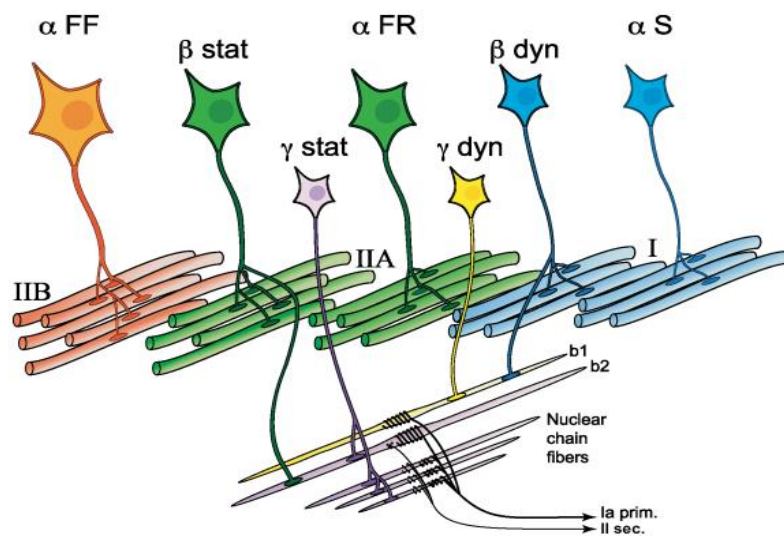


Figure 12 : Représentation schématique des différents types d'unités motrices dans un muscle. Adaptée de Manuel & Zytnicki 2011. Source : [http:// tel.archives-ouvertes.fr](http://tel.archives-ouvertes.fr)

Henneman a montré que les différents motoneurones reçoivent une innervation afférente identique et que, dès lors, l'ordre dans lequel ils entrent en action dépend de leur taille, les plus petits sont mis en action avant les plus grands (figure 13). Ceci a été vérifié dans un grand nombre de conditions expérimentales (activités réflexes, mouvements automatiques, mouvements volontaires lents et rapides).

Lors d'une activité musculaire graduée, l'augmentation de la force s'effectue donc par le recrutement d'un nombre toujours plus important d'unités motrices, les dernières recrutées, qui sont les plus rapides, apportant un supplément de tension plus important que les premières (Massion J, 1998).

Il existe cependant quelques exceptions à cette loi. Ainsi, lors de certaines activités musculaires brèves et intenses (plus de 100% VO₂max, exemple : saut), une commande privilégiée des fibres musculaires (IIB) et donc des unités motrices (FF) se produit directement (Massion J, 1998).. De même, lors de la contraction musculaire rapide et intense qui s'oppose à l'allongement du muscle, l'activation des fibres IIB prédomine (Massion J, 1998). D'autre côté pour les efforts très soutenus (moins de 50% VO₂max, exemple : course lente), la commande privilégiée des fibres musculaires (I) et donc des unités motrices (S) se produit directement.

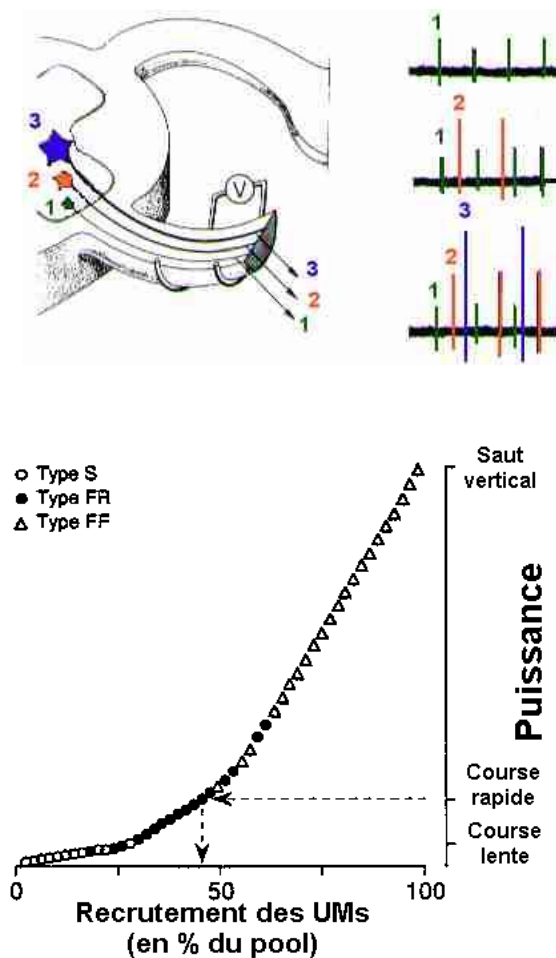


Figure 13 : Loi de Henneman : Modèle théorique du recrutement des UM en fonction de la puissance de l'effort. Ordre de recrutement : les petits MN (lents/S) avant les grands (rapides/FR puis FF). D'après Walmsley et coll. 1978).

3. MODULATION GENETIQUE DE LA TYPOLOGIE

Chez l'adulte, en réponse à la stimulation motoneuronale de type lente et aux augmentations de calcium intra cellulaire, les protéines Calcineurine, CamK, Ras, PPAR δ , Pgc1 α , MEF2, FoxO1 et NFAT sont activées et permettent l'expression d'un ensemble de gènes cibles qui participent au phénotype de la fibre adulte de type lente/oxydative (protéines sarcomériques comme les Myosines et les Troponines et protéines du métabolisme oxydatif) (Zierath JR 2004, Gundersen K. 2010). Les voies de signalisation actives dans la fibre musculaire rapide glycolytique en réponse à la stimulation neuronale de type rapide et les facteurs de transcription qui relaient cette information n'ont pas été identifiés chez les mammifères. Notons néanmoins dans la fibre musculaire de type rapide le rôle de la protéine MyoD, l'activation de la signalisation Erk qui favorise le programme de type rapide, l'accumulation du répresseur de transcription Sox6 qui inhibe l'expression des gènes lents, et enfin l'accumulation préférentielle de HDAC4 (histone déacétylase) dont le rôle est d'inhiber le facteur de transcription MEF2 qui est requis à l'expression des gènes lents (Shi H, 2008 ; Quiat D, 2011).

4. CONTROLE PROPRIOCEPTIF

Les trois types de fibres musculaires sont en permanence sous le contrôle d'un appareil proprioceptif comprenant d'une part le récepteur tendineux de Golgi au niveau des tendons (fibre afférente Ib) (figure 14) et d'autre part deux types de récepteurs situés dans les fuseaux neuromusculaires dans le corps musculaire : les fibres annulospirales ou primaires (Ia) et les fibres secondaires (II) (voir figure 14).

Ces différents récepteurs renseignent sur trois paramètres de l'état du muscle : les (Ib) renseignent sur le niveau de la force et les (II, Ia) sur le niveau de l'allongement (la taille) et dans une plus faible mesure sur la vitesse d'étirement.

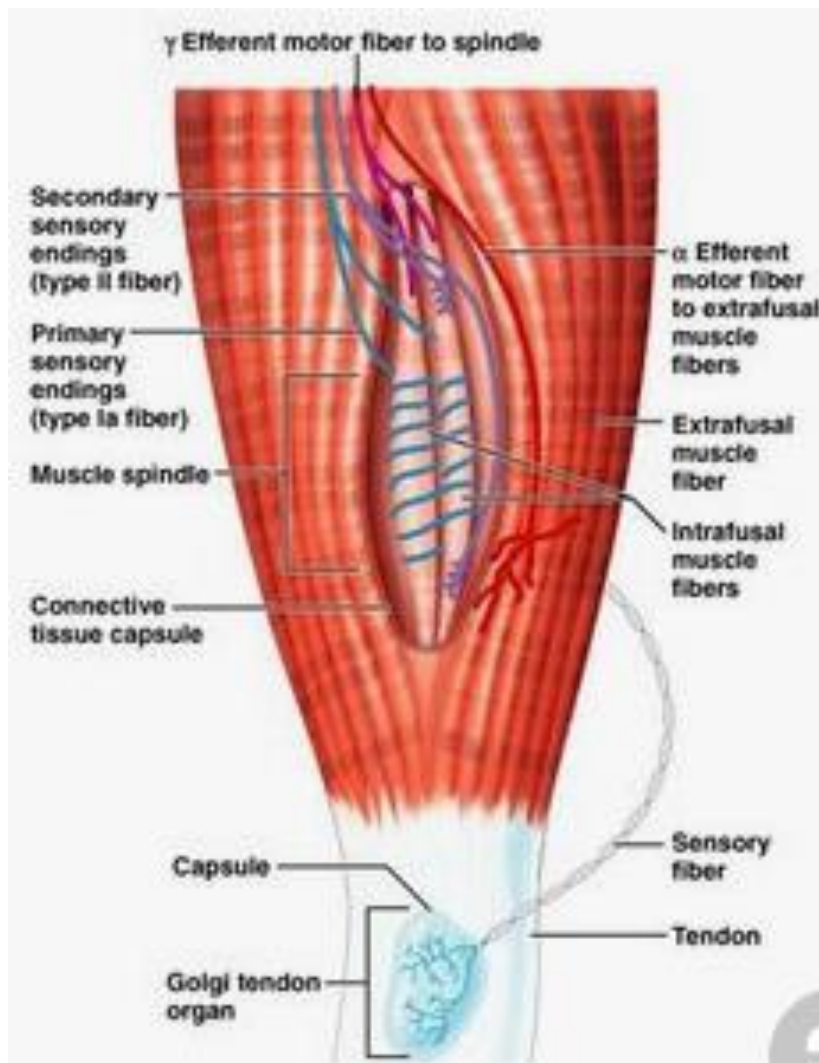


Figure 14 : Les récepteurs proprioceptifs du muscle. Source : <https://www.pinterest.com>

Les récepteurs de Golgi (fibre Ib) sont peu sensibles à l'étirement du muscle et mesurent mal les forces externes imposées au muscle. Ils sont plutôt activés par la contraction des fibres musculaires à tel point qu'un récepteur peut signaler la contraction d'une seule unité motrice (figure 15).

Les récepteurs primaires (Ia) sont sensibles à la fois à la longueur du muscle et à la vitesse d'allongement.

Les récepteurs secondaires (II), sont moins sensibles que les primaires à l'étirement du muscle. Elles codent la longueur du muscle et dans une faible mesure également la vitesse (Massion J, 1998).

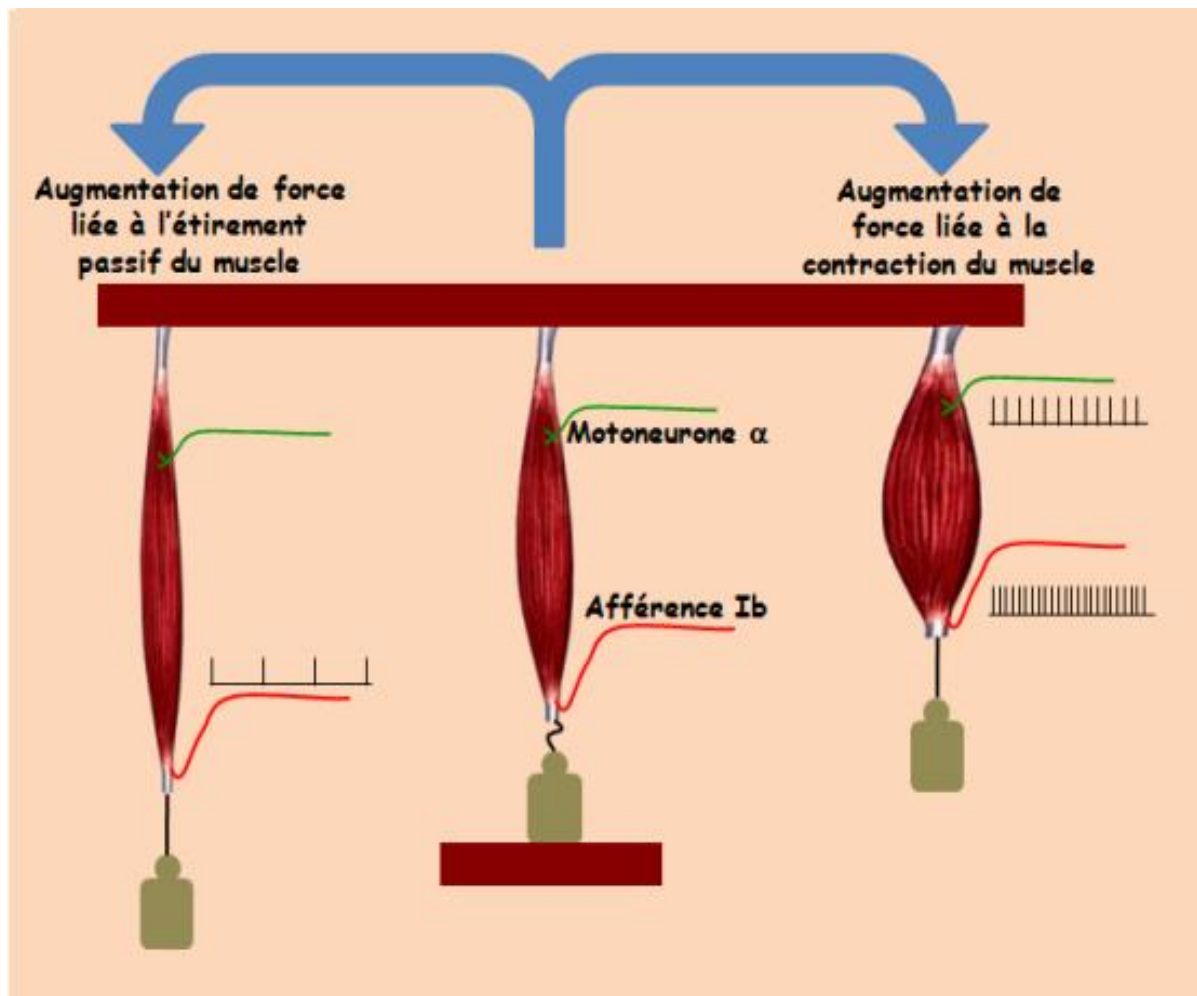


Figure 15 : Variation de la fréquence des potentiels d'action dans l'afférence Ib issue des organes tendineux de golgi. Source : Physiologie des systèmes intégrés, les principes et fonctions. Francis Canon, ressources.unisciel.

L'innervation motrice du fuseau neuromusculaire s'effectue à partir de deux types de motoneurones, les motoneurones gamma et les motoneurones bêta. Pour les motoneurones gamma, ils sont sous contrôle corticale, on distingue deux types : les dynamiques et les statiques, ils contrôlent les variations de longueur (figure 16).

Par son action sélective sur la sensibilité statique ou dynamique, le système nerveux central cortico-spinal peut ainsi accroître l'activité tonique musculaire et, par-là, la résistance du muscle à l'étirement, ou au contraire favoriser une correction phasique à tout changement de longueur (le réflexe myotatique en est un exemple).

Le rôle des afférences proprioceptives musculaires est généralement traité dans le cadre de l'organisation spinale, par rapport à leur action réflexe ou en fonction de leur

participation à un servomécanisme de régulation de la longueur (Ia et II) ou de la tension (Ib). Leur rôle fonctionnel est sous dépendance de deux boucles réflexes de régulation : Néanmoins, l'intervention de mécanismes régulateurs issus de centres supra-spinaux n'est pas exclue via les neurones bêta et gamma.

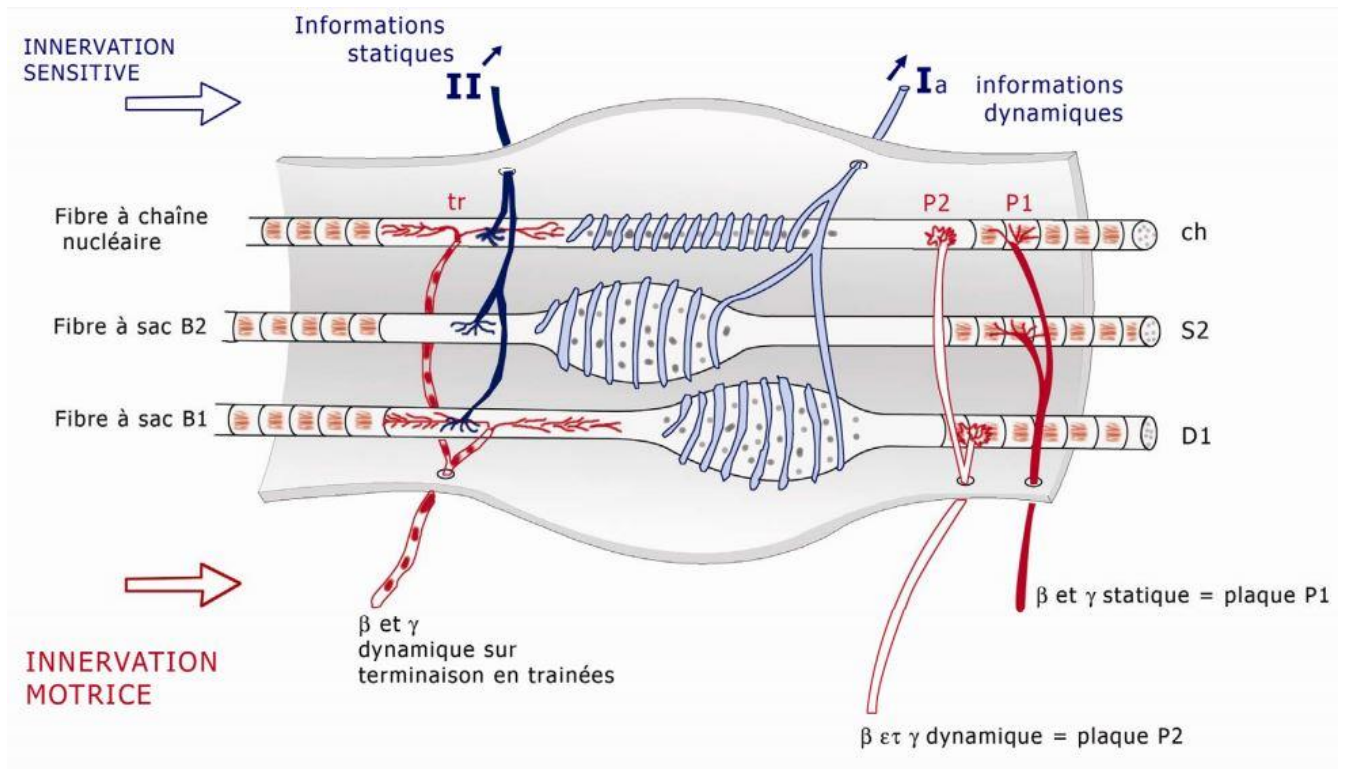


Figure 16 : Innervation du fuseau neuromusculaire. Source : Dr Gérard Hatesse, Service de Médecine Physique, Hôtel-Dieu Paris

Les deux principales voies réflexes potentiellement impliquées dans la régulation nerveuse de l'exercice musculaire : le réflexe myotatique, le réflexe myotatique inverse.

Pour le réflexe myotatique, il comprend une partie afférente formée par les fibres fusoriales primaires (Ia). Celles-ci font synapse sur les motoneurones alpha du même muscle (muscle homonyme) et des muscles synergistes (muscles hétéronymes). Les mêmes afférences ont, par l'intermédiaire d'un interneurone, un effet inhibiteur sur les motoneurones du muscle antagoniste (réflexe d'inhibition réciproque).

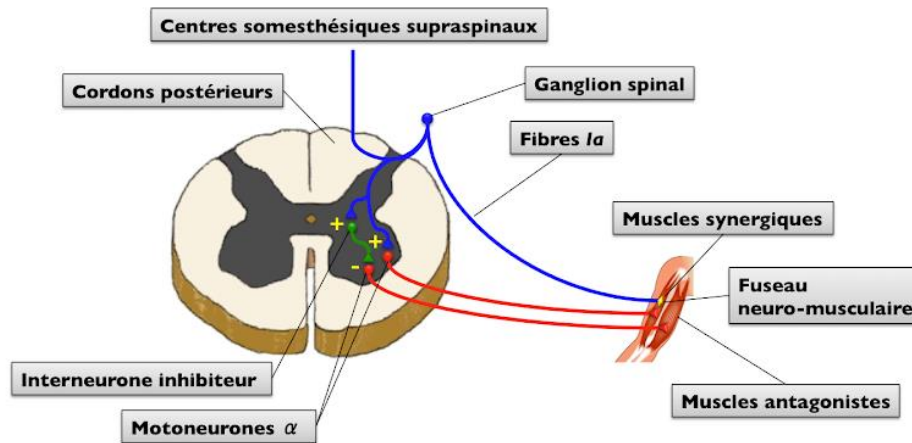


Figure 17 : Le réflexe myotatique. Source : <http://www.aaemr.org>

Pour le réflexe myotatique inverse, il est déclenché par les afférences tendineuses de Golgi (Ib) qui inhibent les motoneurones alpha et gamma du muscle homonyme par l'intermédiaire d'un interneurone. Cette inhibition est de nature phasique. Elle ne se maintient pas lors de contractions musculaires prolongées.

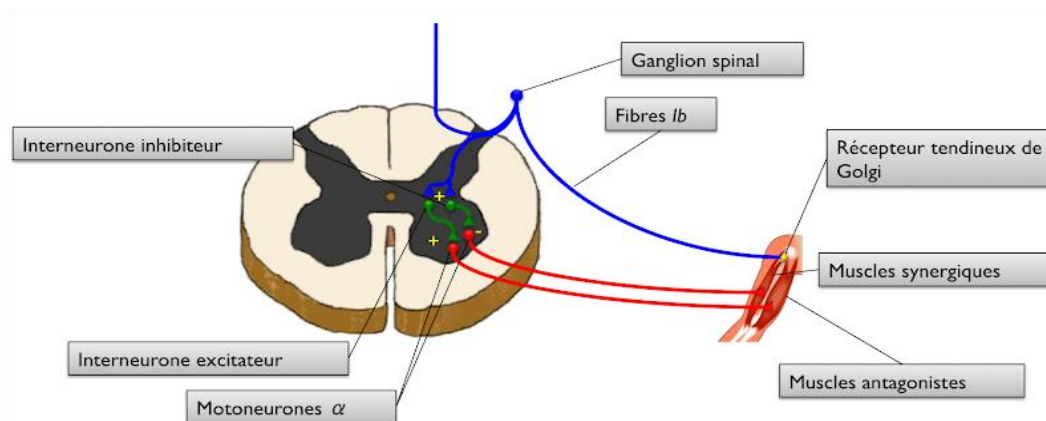


Figure 18 : Le réflexe myotatique inverse. Source : <http://www.aaemr.org>

Par leurs caractéristiques, le réflexe myotatique et le réflexe myotatique inverse ont tendance à s'opposer aux changements de longueur et de tension musculaires. Ils constituent donc une « boucle de rétroaction négative » de protection des muscles.

A côté de ces différents récepteurs du FNM et des OTG, on distingue aussi des récepteurs articulaires regroupant: les corpuscules de Ruffini qui sont sensibles à la vitesse angulaire, la direction du mouvement et à la tension musculaire appliquée à l'articulation en

mouvement , les organes de Golgi-Mazzoni qui sont sensibles à la pression intra-articulaire et à la tension imposée aux ligaments, les corpuscules de Vater-Pacini qui sont sensibles à l'accélération du mouvement de l'articulation et enfin les terminaisons nerveuses libres qui réagissent aux stress mécaniques anormaux (voir figure 14).

5. CONTROLE CORTICO-SPINALE

Les messages nerveux prennent naissance dans les aires cortico-motrices spécifiques de chaque muscle ou groupe musculaire. Les expériences physiques et l'apprentissage technico-tactique sportif sont à l'origine du développement et du renforcement des liaisons neuronales ; de nouvelles dendrites se forment, le nombre de synapses se multiplie et les terminaisons pré-synaptiques s'élargissent ; les cellules neuroniques elles-mêmes synthétisent des protéines spécifiques membranaires qui assurent la conservation et la mémorisation des messages antérieurs répétés et augmentent leurs possibilités de synthèse et de libération de transmetteurs synaptiques: cette programmation neuronale permet de mettre en jeu des circuits préférentiels caractéristiques de schémas d'efforts complexes et différents (Thomas R, 1989). La richesse des liaisons synaptiques permet de moduler toutes ces programmations à partir de stimulations en provenance de l'environnement (charges d'entraînement...) (Thomas R, 1989).

A ces influences, s'ajoutent les effets des contrôles descendants (pyramidaux et extrapyramidaux) et des autres afférences segmentaires des différents récepteurs (Didier, 2009) (figure 19).

Les interneurons de la moelle épinière (excitateurs et surtout inhibiteurs) jouent un grand rôle dans l'articulation entre l'afférence et l'efférence (Bouisset et Maton 1995). Frank et Fuortes (1957) ont signalé que l'inhibition présynaptique engendre la dépression des potentiels postsynaptiques excitateurs (Ia) sans modification du potentiel de membrane du motoneurone. Wall, (1958) a suggéré qu'une synapse excitatrice dépolarise la membrane axonale de la terminaison Ia (présynaptique) près de la fente synaptique, ce qui diminue la quantité de transmetteur libérée par les terminaisons Ia et une réduction de l'amplitude des potentiels excitateurs engendrés par les fibres nerveuse (Ia).

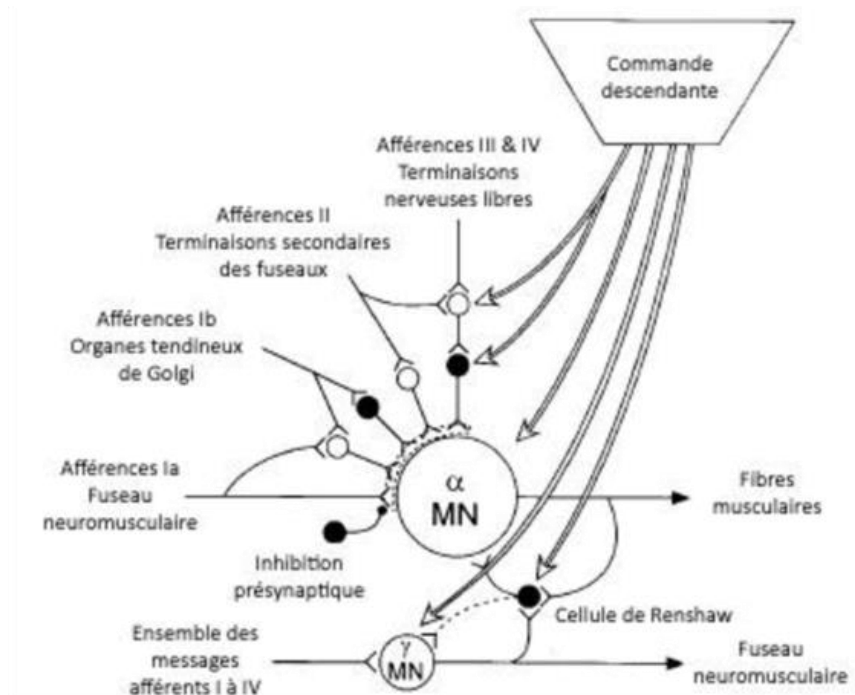


Figure 19 : Influences s'exerçant sur les pools de motoneurones α ($MN\alpha$) et γ ($MN\gamma$) pour un muscle donné (d'après Gandevia 2001)

L'inhibition présynaptique est transmise par des interneurones sur lesquels convergent de nombreuses voies afférentes et descendantes qui peuvent la renforcer ou l'inhiber. Les influx Ia responsables du réflexe monosynaptique peuvent donc être modulés par l'inhibition présynaptique avant d'avoir atteint les motoneurones (Eccles et al., 1962).

Cette neuromodulation peut probablement concerner la TRH, la substance P, l'adénosine...D'autres neurotransmetteurs comme le glutamate, l'acétylcholine, et le GABA peuvent également agir (Heckmann et al. 2004).

III. ADAPTATION NEUROMUSCULAIRE A L'EFFORT

Les caractéristiques d'un muscle peuvent être modifiées par augmentation de la sollicitation mécanique (entraînement), par sa diminution ou sa suppression (arrêt d'entraînement) ou enfin par modification de son allongement physiologique par rapport à l'articulation (étirement).

1. DIFFÉRENCES ENTRE LES SPORTIFS

Les athlètes atteignant un niveau de performance supérieure dans leur discipline sportive, présentent une certaine répartition des types de fibre. Les muscles des athlètes d'endurance présentent généralement une proportion plus importante de fibres lentes (I). Toutefois, les sprinters, ont plus de fibres rapides (II). Les coureurs de fond présentant les meilleures capacités aérobies disposent de la plus forte proportion de fibres lentes, soit autant que 90 à 95 % de fibres à secousse lente (I) dans leur soléaire (McArdle et coll, 2001). D'autre part, les haltérophiles, les lanceurs, les sauteurs en longueur et en hauteur et les sprinters ont sensiblement plus de fibres rapides (IIB) et une capacité aérobie inférieure. D'autres études ont démontré que les hommes et les femmes qui s'adonnaient à des activités de moyenne distance avaient autant de fibres lentes (I) que de fibres rapides (IIB) mais plus de fibres (IIA). On observe également cette distribution chez des athlètes de puissance dans les sports collectifs et les sports de combat (McArdle et coll, 2001). D'un autre côté, les sportifs de puissance ont des fibres Plus volumineuses, surtout leurs fibres rapides. Leur surface de section transversale peut dépasser celle des athlètes d'endurance dont les fibres ont des dimensions normales. En effet, l'entraînement en force et en puissance stimule le développement de l'appareil contractile surtout les filaments d'actine et de myosine.

Il est donc très probable, pour un haut niveau de performance dans une spécialité sportive, qu'un certain myotype (ST ou FT) soit plus avantage que l'autre dans les muscles (tableau 2). Bien que cela suppose une prédétermination génétique avec l'ACTN3 comme gène responsable de la production d'alpha-actinin-3 (Yang et coll., 2003), une protéine moléculaire que l'on retrouve dans les fibres rapides IIA et IIB et l'ACE comme gène codant pour l'enzyme de conversion de l'angiotensine I en angiotensine II, un important vasoconstricteur contribuant à la performance aérobie (Montgomery et coll., 1998).

La répartition des types de fibre n'est certainement pas le seul facteur de performance car plusieurs chercheurs ont démontré, tant pour des individus entraînés que pour d'autres non entraînés, que l'identification d'un type prédominant de fibres avait peu de valeur indicatrice de la performance

Tableau 2 : Pourcentage des myotypes selon la spécialité sportive. source :<https://cursus.univ-rennes2.fr>

Athlète	Sexe	Muscle	%ST	%FT	Surface de section (μm^2)	
					ST	FT
Sprinters	M	Jumeaux	24	76	5,878	6,034
	F	Jumeaux	27	73	3,752	3,930
Coureurs de fond	M	Jumeaux	79	21	8,342	6,485
	F	Jumeau	57	43	6,333	6,116
	F	Vaste externe	51	49	5,487	5,216
Nageurs	M	Deltoïde postérieur	67	33	—	—
Haltérophiles	M	Jumeaux	44	56	5,060	8,910
	M	Deltoïde	53	47	5,010	8,450
Triathlètes	M	Deltoïde postérieur	60	40	—	—
	M	Vaste externe	63	37	—	—
	M	Jumeaux	59	41	—	—
Canoéistes	M	Deltoïde postérieur	71	29	4,920	7,040
Lanceur de poids	M	Jumeaux	38	62	6,367	6,441
Non entraînés	M	Vaste externe	47	53	4,722	4,709
	F	Jumeaux	52	48	3501	3141

Ce n'est pas surprenant, car la performance est l'aboutissement de l'interaction optimale de plusieurs systèmes (nerveux, métabolique et biomécanique) et non pas d'un seul facteur comme le type de fibre musculaire.

Afin de déterminer si la proportion des fibres de certains groupes d'athlètes est due à la charge d'entraînement, Des études réalisées avant et après un programme d'entraînement, n'ont révélé aucun changement de proportion de types de fibre, bien que la capacité de travail et la puissance aérobie ou anaérobie des sportifs se soient beaucoup améliorées.

D'autres études, laissent cependant penser à la possibilité de modifications de leurs propriétés bio-cinétiques et physiologiques et de leur type, suite à un programme d'entraînement aérobie ou anaérobie (conversion réelle des fibres) (McArdle et coll, 2001).

2. ADAPTATION A L'ENTRAINEMENT CHRONIQUE

Toute application de charge d'entraînement spécifique est associée à la bonne réalisation d'un ensemble d'efforts mixtes (isométrique, concentrique, excentrique et plyométrique), ce qui explique éventuellement la complexité de la tâche pour performer dans une épreuve physique.

La plupart des aptitudes physiques correspondent à des moments particuliers situés sur un continuum relationnel entre la charge d'entraînement et la durée (Howald, 1974). On constate donc, qu'il n'existe pas qu'un seul mode de production d'énergie pour un effort donné (excepté pour les efforts explosifs et ceux très soutenus) (figure 20).

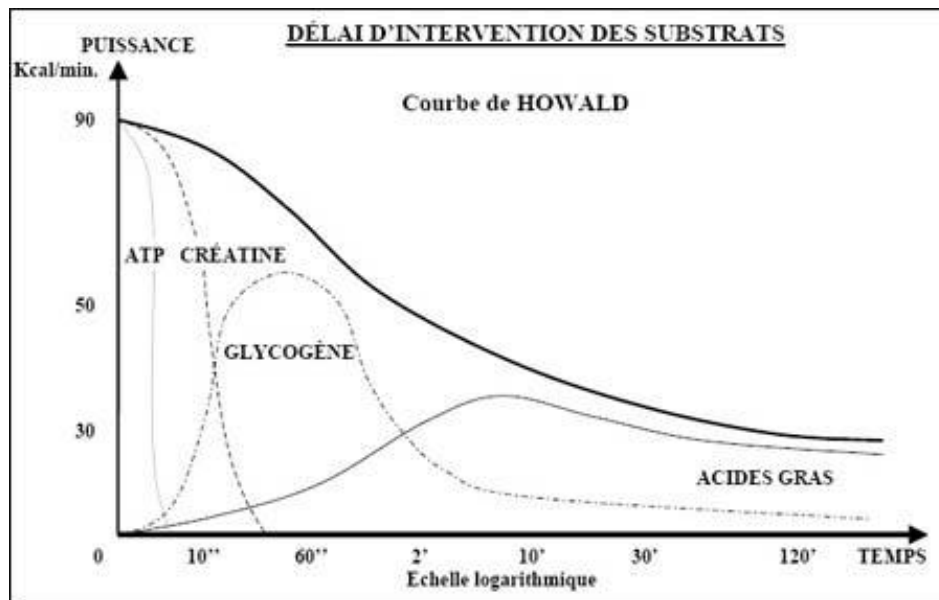


Figure 20 : Courbe d'Howald schématisant la proportion relative des 3 filières énergétiques selon la durée de l'effort. D'après Howald (1974).

Si on applique des charges qui varient en intensité et en durée, les capacités du muscle augmentent toujours mais le progrès est modulé en fonction de l'importance relative de ces deux facteurs. Avec des charges nombreuses de faible intensités l'effort est plus soutenu dans le temps et le muscle présente des qualités d'endurance plus importantes, alors qu'avec des charges à intensités élevées, la puissance est maximale mais courte dans le temps comme le montre (figure 21).

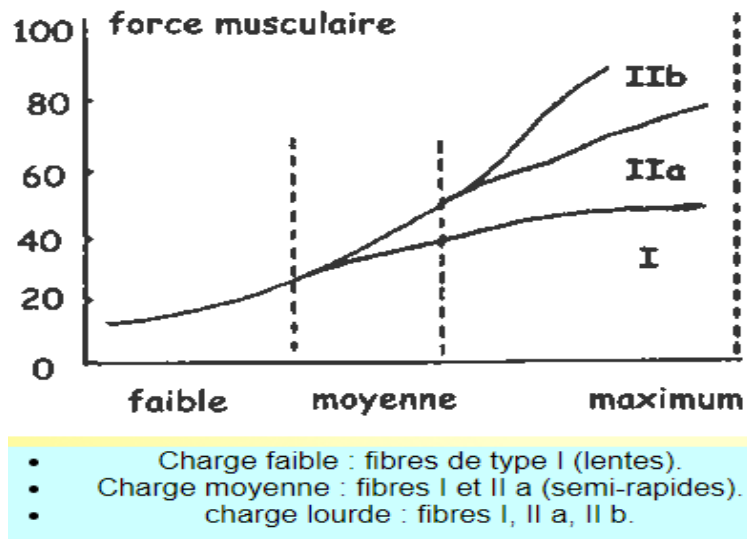


Figure 21 : Recrutement des fibres selon la charge de l'entraînement. Source : <http://gilbert.wiederkehr.pagespersorange.fr>

3. MODIFICATIONS METABOLIQUES

Il est connu de longue date que les changements d'expression de protéines métaboliques précèdent les changements d'isoformes de protéines contractiles (Pette D, 1985). Trois principaux facteurs induisant ces modifications ont été décrits :

Premièrement, la fréquence des augmentations de calcium intracellulaire générées par les cycles excitation-contraction est décodée par plusieurs senseurs calciques (Berchtold MW, 2000), permettant l'expression ciblée, selon le type d'exercice effectué, de protéines comme la cytochrome oxydase (Freyssenet D, 1999).

Deuxièmement, les variations du ratio intracellulaire ATP/AMP activent une protéine : l'AMPK (5'-AMP-activated protein Kinase) initiant l'expression de gènes métaboliques (Bergeron R, 2001 ; Hood DA, 2001).

Finalement, bien qu'il soit publié que l'hypoxie tissulaire atteint un minimum à des niveaux d'exercice très bas (Richardson RS, 2001), de nombreuses publications attribuent un rôle à la pression partielle d'oxygène intracellulaire dans la plasticité musculaire

De même, il est reconnu que l'entraînement spécifique améliore la puissance métabolique de ces fibres chez les sportifs. De fait, les isoformes de transition (IIc=IIx) pourraient ainsi évoluer soit vers le type I (Hortobagyi et al. 2000), IIA (Liu et al.2003) ou IIB

suivant le mode de sollicitation musculaire (figure 22). L'entraînement en endurance peut donc, augmenter la proportion de fibres I et IIA (Liu et al.2003). Par contre l'entraînement de puissance et de force peut entraîner une transformation en fibres II (W. McArdle et coll, 2001). Ainsi, les propriétés métaboliques et biochimiques pourraient donc être modifiées sous l'effet de ces charges physiques auxquelles le muscle est soumis (Costill et al. 1979).



Figure 22 : Transformation des fibres selon Howald- 1989 : Modification typologique des fibres (difficile dans le sens I vers IIb et facile dans le sens inverse) source ; <http://yk.prepaphysique.free.fr>

Il existe une grande variabilité aussi bien entre sportifs de disciplines différentes qu'entre individus de la même discipline en ce qui concerne la proportion et les types de fibres qui constituent les différents tissus musculaires squelettiques. Cette variabilité se retrouve également dans la capacité de chaque individu à fournir un exercice aérobie ou anaérobie. De nombreuses études, chez l'homme, se sont intéressées à corréler le profil individuel de répartition d'isoformes de protéines musculaires avec les performances physiques des sujets étudiés.

A l'heure actuelle, il n'existe pas assez de données dans la littérature pour établir des corrélations entre tous les types de fibres musculaires déterminés selon les diverses méthodes à disposition et les différents types d'exercice musculaire. En fait, à ce jour, seule la distinction la plus élémentaire entre fibres lentes (type I, oxydative) et rapides (type II, glycolytique) a pu être corrélée de manière.

Il est fort probable que le type de fibre musculaire ne soit pas le seul déterminant de la performance maximale atteignable, soit en endurance, soit en force et vitesse. Il paraît ainsi également nécessaire de prendre en compte d'autres facteurs de la performance, comme pour l'endurance, la VO₂ max, le débit cardiaque maximal, voire des facteurs centraux (cérébraux) ou pour la force, des facteurs neuromusculaires (synchronisation des unités motrices,

coordination intra- et intermusculaire) et d'autres liés à l'étirement de la structure tendomusculaire (Zierath JR, 2004).

Lors d'un travail d'endurance, il a été démontré diverses modifications musculaires, caractérisées par une hyperexpression d'activateurs nucléaires de la transcription parmi lesquels le Peroxisome proliferator Gamma Coactivator 1 (PGC-1) et le Peroxisome Proliferator Activated Receptor delta (PPAR delta) (Fluck M, 2003) :

- * d'abord une augmentation du volume mitochondrial total des trois types de fibres, plus nette sur les fibres de type IIa ; associée à un accroissement de la capacité oxydative de la fibre musculaire ;

- * une augmentation de la capillarité musculaire,

- * ensuite, une transformation potentielle de fibres rapides en lentes, avec essentiellement expression de fibres contenant des isoformes MyHC IIa ou alors d'hybrides de type I/IIa ; un processus de down-regulation spécifique des mRNA des isoformes MHC de type IIx a aussi clairement été montré.

Lors d'un travail de résistance, d'autres adaptations purement musculaires ont été documentées (Fluck M, 2000), reliées en particulier à une régulation concertée de programme d'expression génique au moyen de facteurs de transcription comme la myogénine, MRF4, SKI, etc. :

- * tout d'abord, un accroissement de la surface de section du muscle essentiellement consécutif à une augmentation du volume myofibrillaire (modifications du turn-over des protéines contractiles avant tout), prédominant nettement sur les fibres rapides et surtout de type IIa (up-regulation) ; l'augmentation de taille des fibres exprimant purement MyHC IId/x ne paraît être que d'une importance mineure ;

- * par contre, la densité mitochondriale est fortement réduite, pouvant tomber jusqu'à moins de 2% chez certains athlètes d'élite de force ;

- * une activation des cellules satellites (marqueurs de la myogenèse) qui paraît être nécessaire au processus d'hypertrophie, permettant par fusion aux fibres existantes d'accroître le nombre de noyaux de la fibre en croissance (maintien du rapport nucléo-cytoplasmique) ;

- * enfin, l'architecture musculaire est primordiale, les muscles d'un athlète de force ou de vitesse démontrant une longueur accrue, statistiquement significative, favorable au développement d'une vitesse de contraction élevée (nombre de sarcomères en série) et surtout

un angle de pennation plus faible permettant le développement de tensions musculaires importantes (Abe T, 2000).

La charge physique spécifique peut en effet, stimuler l'adaptation des micro-organites de la fibre musculaire (mitochondrie, myofibrille, réticulum sarcoplasmique, etc....). L'augmentation du volume et du nombre des mitochondries est engendrée par les exercices d'endurance alors que ceux qui favorisent la puissance provoquent une augmentation du volume des myofibrille (hypertrophie) (Andersen et Aagaard, 2000).

4. TYPOLOGIE ET PERFORMANCE PHYSIQUE

Chez le sportif, plusieurs études ont montré les rapports entre la typologie musculaire et la discipline sportive pratiquée (Bergh et al 1978). La relation entre la typologie et la performance de contraction a été démontrée chez l'homme (Thorstensson et al 1976). Il en est de même pour la vitesse maximale de contraction. Il existe également une relation entre la consommation d'oxygène VO₂ et la typologie musculaire des muscles locomoteurs : le pourcentage de fibres lentes est plus élevé dans les disciplines nécessitant une proportion plus élevée de la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max) (Bergh 1978). Ces compositions en fibres sont le résultat d'une spécialisation des athlètes, à la fois par la sélection sportive des individus les plus aptes et par la pratique d'un entraînement spécifique.

D'autre part, certains auteurs ont suggéré qu'un entraînement en force pouvait induire une amélioration de la capacité à recruter le plus grand nombre d'unités motrices (Pensini et al., 2002), et que l'intensité de la commande nerveuse issue du cortex moteur était plus élevée (Aagaard et al., 2002). Ceci pourrait s'expliquer par une excitabilité accrue des motoneurones α et/ou par une réduction de l'inhibition pré-synaptique des afférences Ia des fuseaux neuromusculaires (Aagaard et al., 2002). Ce type d'adaptation faciliterait alors l'activation d'un nombre plus important de motoneurones α .

De leur part, (Kamen et Knight, 2004 ; Patten et al., 2001; Van Cutsem et al., 1998) ont attribué l'augmentation du niveau d'activité motoneuronale après un entraînement en force par l'élévation de la fréquence de décharge des unités motrices, mise en évidence au moyen d'électrodes intramusculaires.

Enfin, (Enoka, 1997 ; Evetovich et al., 2001; Higbie et al., 1996), ont suggérer que l'augmentation du niveau d'activité électromyographique des muscles agonistes observés

après entraînement, repose sur une meilleure synchronisation des décharges des unités motrices.

Cependant, il est probable que les trois hypothèses évoquées par les différents chercheurs pour expliquer l'augmentation de la performance musculaire (synchronisation des UM, recrutement des UM et augmentation de décharge des UM), évoluent de façon concomitante au cours de l'entraînement. L'action combinée de ces différents processus au cours de l'entraînement pourrait alors induire une augmentation de force sans que l'on puisse détecter un quelconque effet de chacun de ces processus étudiés séparément (Marie-Agnès Giroux-Metges, 2003). Ainsi, l'entraînement dynamique concentrique (Duchateau, 2014) apporte plus de développement que l'isométrique ou l'excentrique en garantissant une meilleure force-vitesse pour n'importe quel type d'effort physique (figure 23) et donc, en favorisant un myotype par rapport à un autre. En effet, la contraction excentrique n'a pas les mêmes stratégies neurales que la concentrique ou l'isométrique. La différence est dû à une inhibition possible au niveau spinal (Lechauve JB et al, 2014).

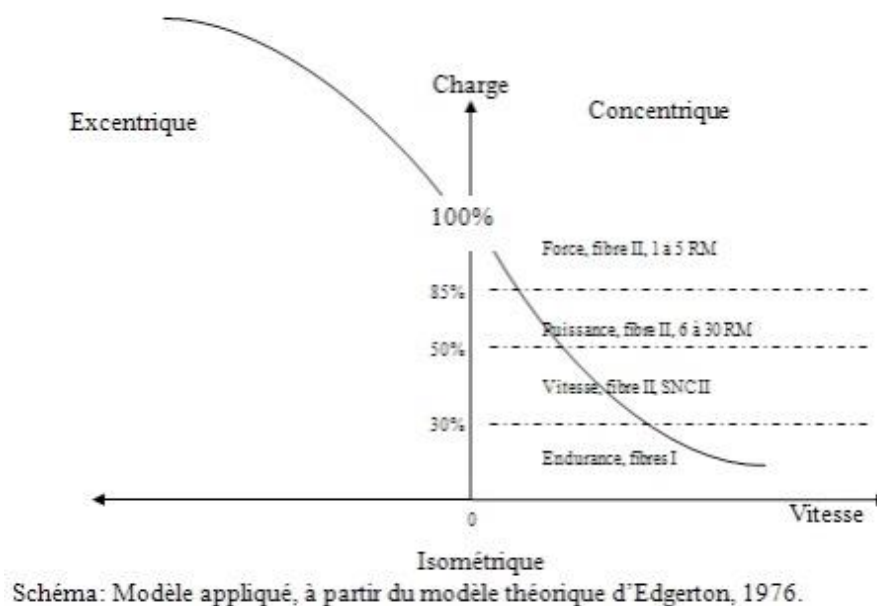


Figure 23 : Relation entre le type de l'effort, l'intensité et la vitesse. (1RM : charge maximale, 6RM : 6 répétition avec une charge correspondante à 50% de la charge maximale, SNC : système nerveux centrale) source : <https://nutres-fr.com>

En cas d'hypoactivité musculaire, Bagust (1979) a signalé une amyotrophie et une diminution des forces contractiles des unités motrices. Nicks. 1989, a enregistré une diminution de la taille des fibres musculaires. D'autres études ont enregistré l'atrophie des

fibres musculaires rapides (Edstrom et al., 1973), une hypertrophie des fibres lentes (Edstrom, 1970) et enfin l'apparition d'une nouvelle classe de fibres motrices, lentes et fatigables (Young et Mayer, 1982).

Les auteurs qui ont étudié l'effet de l'immobilisation ont observé une chute de l'activité électromyographique surtout pour le muscle lent ; cette immobilisation affecte donc les propriétés contractiles et fait chuter la force tétanique des unités motrices (Fischbach & Robbins, 1969).

5. ADAPTATION A L'ETIREMENT

Pour évaluer et comprendre l'effet des étirements passifs ou actifs sur la performance, de nombreuses études ont vu le jour introduisant toujours un protocole d'étirement à l'échauffement, suivi de mesures de performance (saut vertical, temps de sprint, répétition maximale, temps de récupération, force maximale volontaire...) (Kay AD, Blazeovich AJ., 2012).

A court terme, Nelson AG et al, (2005), ont noté que les étirements passifs maintenus sur de longues durées entraînent une diminution du débit sanguin intramusculaire. Palomero J et al, (2012), ont souligné le fait qu'un étirement musculaire passif entraîne une accumulation des déchets métaboliques et une diminution de l'oxygénation et du débit sanguin musculaire. De sa part , Guissard et al, (2001) ont montré que la diminution de l'activité neuronale durant l'étirement revient à la normale immédiatement après l'étirement. De même, (LaRoche DP, 2006) et (Herda TJ, 2010) ont constaté que la déformation viscoélastique passive fait diminuer la tension passive qui disparaît en moyenne au bout de 30 minutes à une heure, ce qui montre que les changements aigus de la tension passive musculaire sont transitoires.

Pour expliquer cette réduction de la résistance, Guissard N, (2004) a suggérer que le facteur limitant durant l'étirement est la résistance musculaire secondaire à l'activité réflexe, en conséquence, le but de l'étirement est d'inhiber cette activité réflexe, ce qui permet de grandes amplitudes articulaires.

De plus, certains auteurs ont observé, suite à des étirements, une diminution de l'excitabilité des fibres Ia sur le motoneurones alpha possiblement due à une diminution de la décharge des fuseaux neuromusculaires via une augmentation de la compliance de l'unité

musculo-tendineuse (Avela J et coll., 1999) ou par la diminution du nombre de fibres activées après étirements (Beedle B et coll., 2008).

Les étirements restent donc, un bon moyen pour permettre une diminution de l'activation des motoneurones (baisse du tonus musculaire) et une diminution de la raideur du complexe anatomique musculo-tendineux (Pousson.M, 2001).

A long terme, le nombre de sarcomères en série pouvait être augmenté par l'étirement (Goldspink et coll, 1995). Ceci suggère que le muscle est capable de fabriquer de nouvelles longueurs fonctionnelles en modifiant le nombre et la taille des sarcomères afin d'optimiser la force de production en situation dynamique. Ceci a conduit (Nakamura M, 2010) de penser à une augmentation du nombre sarcomères (figure 24). Cette observation supporte l'hypothèse selon laquelle la structure musculaire s'adapte à des changements chroniques de la demande fonctionnelle (Csapo R et coll, 2010).

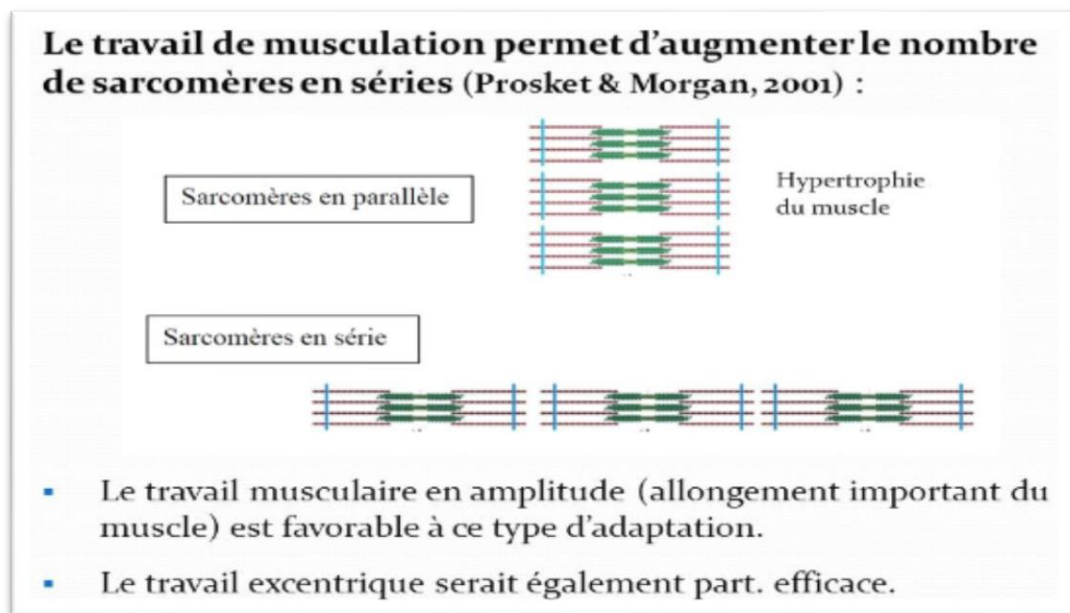


Figure 24 : Multiplication des sarcomères. Source : www.culturestaps.com

De même, les étirements n'ont jamais été associés à une réduction permanente de l'activation neuro-musculaire. De nombreuses études n'ont signalé aucun changement chronique de l'EMG après des étirements malgré une augmentation de l'amplitude de mouvement. Ainsi, la diminution de l'activité motoneuronale n'apparaît pas comme un mécanisme probable pour l'augmentation de l'amplitude par les étirements (LaRoche DP, 2006).

De toute façon, la majorité des recherches sur les effets des étirements n'ont pas excédé 4 à 8 semaines et n'ont peut-être pas été assez longues pour enregistrer des modifications. Il est fort probable que les programmes sur le long terme produisent des changements permanents dans les propriétés physiques du muscle (LaRoche DP, 2006).

Des mesures de force concentriques, excentriques et isométriques ont montré que ce n'est que pour un temps d'étirement en pré-effort supérieur à 60 secondes (et non inférieur) qu'une diminution de la performance a été enregistrée (Behm DG et coll., 2016). La diminution de la force musculaire a été significative jusqu'à deux heures après les étirements statiques, suivi d'un retour à la normale (Behm DG et coll., 2016).

Pour (Guissard N et coll., 2001), cette diminution est due à des mécanismes pré-synaptiques (pré-motoneuronaux) pour des étirements de faible amplitude et à des mécanismes postsynaptiques pour des amplitudes supérieures. Il semble y avoir une diminution de l'excitation des motoneurones α (Bishop D., 2003 ; Geoffroy C., 2015) et l'amplitude du réflexe d'étirement (myotatique) semble, elle aussi diminuée (Paradisis GP., 2014), puis retrouve ses niveaux de départ en quelques minutes.

Par conséquent, quelle que soit le type d'étirement utilisé (actif ou passif), ce sont des effets négatifs immédiats sur la performance qui ont été toujours signalés (McNair 2001).

6. PREDICTION DE LA PERFORMANCE D'APRES LA MYOTYPOLOGIE

Chez l'athlète humain, la performance sportive dans une discipline donnée résulte d'un ensemble de facteurs : Les qualités neuro-sensorielles, biomécaniques, psychologiques, la capacité cardio-respiratoire, les propriétés contractiles des muscles et les caractéristiques morphologiques de l'individu sont les principaux facteurs intrinsèques impliqués dans l'effort physique (Holzer NJ, 2006). La performance sportive est donc un caractère très composite qui est quasiment imprévisible du fait du grand nombre de facteurs à prendre en compte. Mis à part les facteurs environnementaux, la performance physique est-elle corrélée à la composition en fibres des muscles qui y contribuent (Holzer NJ, 2006). L'étude du déterminisme de la typologie musculaire a montré le rôle du système nerveux dans la différenciation des fibres musculaires. La puissance musculaire qui dépend du nombre total de fibres, de leurs propriétés contractiles et énergétiques, n'est qu'un des éléments de la

production de l'effort physique. La typologie musculaire a semblé -t- il un rôle prédominant et le génotype du sportif aurait d'autant plus d'importance ; elle est probablement un facteur nécessaire mais non limitant dans la mesure où le travail d'entraînement peut l'améliorer. Chez l'athlète, la typologie musculaire a sans aucun doute des rapports étroits avec la performance sportive dans les disciplines où la composante physique est dominante (sprint, demi-fond, marathon, saut...). Dans le cas des sports collectifs, cela reste encore à démontrer mais l'existence de sportifs dotés d'autres caractéristiques morphologiques et biomécaniques déterminantes apporte déjà un élément de réponse.

La connaissance des principaux facteurs de variation de la typologie musculaire a montré l'importance de l'âge, de la génétique mais aussi de l'entraînement. Et avec le développement des nouvelles techniques, il est maintenant possible d'envisager des études sur des effectifs plus importants que ne le permettaient les techniques antérieures...

PARTIE 2 : ETUDES EXPLORATOIRES

INTRODUCTION

L'électromyographie est centrale dans les sciences appliquées au mouvement et dans le milieu clinique. Deux techniques existent : l'enregistrement EMG intramusculaire et l'enregistrement de surface (Photo 1). Le premier est réalisé par des électrodes à aiguilles placées à l'intérieur d'un muscle, il fournit une mesure de l'activité électrique d'un petit nombre d'unités motrices. A l'inverse, le second, réalisé par des électrodes placées sur la peau en face d'un muscle permet l'exploration d'un volume musculaire plus conséquent (Mariaconcetta VINTI ; 2012).

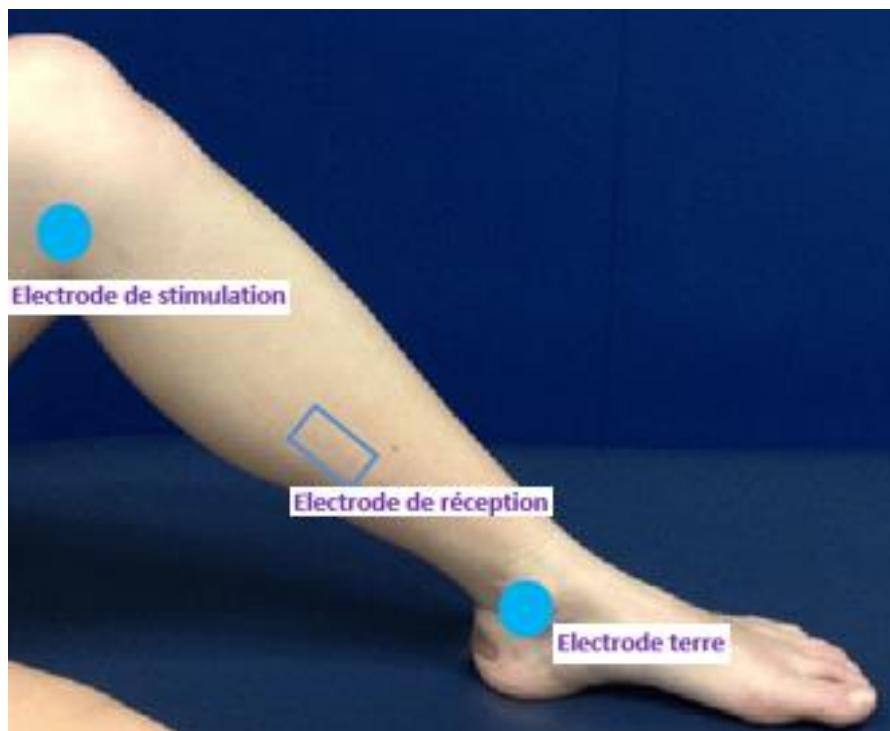


Photo 1 : Exemple de positionnement des électrodes de surface (ici sur le muscle soléaire).
Source : Paolo Sanzo, <https://www.researchgate.net>

L'amplitude du signal EMG détecté par ces électrodes peut être appréciée globalement et reflète le nombre total d'unités motrices recrutées. La taille des unités motrices varie ainsi que l'amplitude de leur dépolarisation. Les petites unités motrices à secousse lente recrutées pour de faibles forces ont une fréquence d'apparition inférieure à celle des grosses unités motrices à secousse rapide recrutées pour des forces plus élevées. L'intensité du courant électrique qui dépend du nombre d'unités motrices mises en jeu est liée à la tension musculaire développée.

L'électro-neurostimulation du nerf engendre deux types de réponse : A une faible intensité de stimulation électrique, les fibres nerveuses afférentes sont excitées préférentiellement parce qu'elles ont de grands diamètres. On obtient donc une réponse réflexe dénommée réflexe H (d'après Hoffmann., 1910).

En pratique, la stimulation électrique du nerf à diverses intensités provoque deux réponses électro-myographiques dans le muscle : les ondes M et H. Le maximum de l'onde H (Hmax) est provoqué par une stimulation nerveuse sous-maximale et est principalement dû à l'activation des unités motrices à contraction lente (Schieppati M., 1987 ; Capaday C., 1997). L'onde maximale M (Mmax) est induite par la stimulation nerveuse supramaximale de toutes les unités motrices (y compris les unités rapides). Ce sont ces outils (réflexe-H et onde-M) qui ont été utilisés dans cette recherche pour vérifier le niveau d'excitabilité spinale. En effet, cette méthode est depuis de nombreuses années très utilisée par les chercheurs pour distinguer les adaptations du système nerveux à un effort physique, aigu ou chronique.

Avec ses travaux en 1997, Charles Capaday a montré que le réflexe H est considéré comme une estimation de l'excitabilité des motoneurons alpha (α MN), de l'inhibition présynaptique et de l'excitabilité intrinsèque des α MN.

Guillaume Millet en 2005 a rapporté que le réflexe de Hoffmann n'est facilement mesurable que dans quelques muscles (soléaire en particulier) notamment en raison de la différence de densité et d'efficacité des connexions monosynaptiques des afférences à sur les motoneurons alpha entre les muscles. Il a aussi rapporté que ce réflexe H peut être assimilé à un réflexe d'étirement qui s'affranchirait de l'influence des récepteurs des fuseaux neuromusculaires et qu'il pouvait être modifié par l'entraînement suggérant ainsi que la stimulation chronique pouvait non seulement influencer l'excitabilité des motoneurons mais aussi la réponse des récepteurs musculaires à l'étirement. Il rapporte aussi qu'il a été observé une diminution de l'amplitude du réflexe H (normalisée par rapport à l'amplitude de l'onde Mmax), possiblement en raison d'une inhibition des motoneurons due aux afférences périphériques stimulées par les changements métaboliques (Johnson, 1973).

Les recherches ont montré que le réflexe de Hoffmann était déjà considéré comme un outil électromyographique en exploration neuromusculaire et pour estimer l'évolution du pourcentage de motoneurons toniques parallèlement au type d'entraînement effectué.

Néanmoins, le comportement du système neuromusculaire à des charges d'entraînements a été peu étudié. Les résultats de toutes les études indiquent que la régulation

nerveuse développée serait liée d'une part à des processus périphériques associés aux récepteurs musculaires et articulaires (Babault et al., 2001), et d'autre part à des processus centraux intervenant au niveau supra-spinal (Aagaard et al., 2002 ; Priori et al., 2001). De plus, lorsque le système neuromusculaire est soumis à des sollicitations chroniques, ses stratégies nerveuses de régulation sont modifiées (Enoka, 1997 ; 2006), des adaptations sur le plan structural s'opèrent également (Abernethy et al. 1994 ; Pette, 1998). Aussi, certaines études ont montré qu'au cours des premières semaines d'un programme de renforcement musculaire, les gains observés au niveau de la force sont principalement dus à des adaptations d'origine nerveuse (Enoka, 1997).

En effet, c'est dans le cadre d'apporter des informations sur le comportement du système neuromusculaire à des efforts physiques que ce travail de thèse cherche via l'étude de l'amplitude du réflexe H, si on peut estimer le degré de l'excitabilité motoneuronale spinale chez les sportifs ? Aussi, si ce réflexe H varie selon le type d'entraînement et le type d'effort musculaire ? Et enfin, si l'utilisation de ce réflexe peut être considérée comme utile afin de suivre l'effet des charges des entraînements sur les performances physiques et de mieux personnaliser les programmes et contenus des entraînements et suivre la progression des sportifs dans leurs spécialités ?

Pour ceci, une première étude a été réalisée pour comparer l'adaptation de la réponse réflexe de Hoffmann (H) et de l'onde motrice M entre sportifs de différentes disciplines (athlétisme, football, nage). Une deuxième étude afin d'analyser les adaptations motoneuronales et la transmission synaptique spinale suite à des allongements musculaires (étirements). Enfin, une troisième pour comparer les effets des entraînements physiques à long terme sur cette plasticité synaptique motoneuronale chez différents athlètes (sprinteurs et endurants).

Dans le cadre de la pratique sportive, le test "réflexe de Hoffmann" a été utilisé par Casabona et al. (1990) pour comparer le réflexe H dans les muscles du Soleus et du Gastrocnémien entre les sportifs spécialisés en pratique sportive de vitesse et de force (sprint et Volley Ball) et les personnes qui ne pratiquent pas de sport. Ils ont observé que la moyenne du rapport H_{max} / M_{max} était plus basse chez le groupe des sportifs comparé aux non sportifs. Ceci serait dû à une plus petite amplitude du réflexe H. La comparaison cette fois-ci des pratiquants de sports de vitesse et de force avec les personnes pratiquant les sports d'endurance, et avec les personnes non pratiquantes a montré que le rapport H_{max} / M_{max} a

été plus élevé chez les sportifs d'endurance et plus bas chez les sportifs de vitesse et de force (Maffiuletti NA, 2001).

Sachant que le réflexe de Hoffmann est considéré comme une estimation de l'excitabilité des motoneurones alpha (α MN) et de l'inhibition présynaptique (Nielsen J, 1993) et afin de comprendre dans quelle mesure le système nerveux peut s'adapter à des programmes spécifiques d'entraînement sportif, nous avons choisi d'étudier la plasticité neuronale spinale avec quatre différents types de sports. Ainsi, déterminer si la pratique d'un type de sport affecte les réponses H et M et permet des modifications myotypologiques et des adaptations neuronales et musculaires spécifiques.

I. MATERIEL ET METHODES

1. ECHANTILLON

4 groupes de 14 sportifs chacun (sprinteurs, athlètes demi-fond, footballeurs et nageurs, âge : moyenne $22,41 \pm 2,05$ ans, taille : moyenne $1,74 \pm 0,06$ m, poids : moyenne $66,05 \pm 5,76$ kg), volontaires, en bonne santé, sans maladie neurologique ni blessures, sans antécédents de troubles des membres inférieurs ont participé à l'étude après avoir été informés des conditions expérimentales. Tous les sportifs (garçons et filles) étaient toujours impliqués dans leurs programmes d'entraînements réguliers de force ou d'endurance spécifiques. Ils ont reçu tous les éclaircissements nécessaires avant d'être inclus dans l'étude afin de respecter les principes éthiques applicables à la recherche médicale impliquant des êtres humains (Déclaration d'Helsinki de L'Association Médicale Mondiale, 1964).

Pour former quatre groupes, nous avons choisi des sportifs de niveau national et international qui suivaient quotidiennement leurs entraînements. Leurs programmes annuels des entraînements étaient supervisés par des entraîneurs nationaux spécialistes dans leurs disciplines, et qui étaient très coopératifs en nous communiquant d'une façon globale les volumes annuels des entraînements aérobies et anaérobies en termes de pourcentage. En effet le volume consacré au développement de l'endurance était plus grand que celui de développement de la force et de l'explosivité dans le planning des nageurs (80%, 20% respectivement) comparé à celui des footballeurs (60%, 40% respectivement), des athlètes demi-fond (50%, 50% respectivement) ou des sprinteurs-sauteurs (10%, 90% respectivement). L'intensité des différentes sollicitations aérobies augmentaient

progressivement au cours de la saison surtout chez les nageurs et les footballeurs. La charge a été surveillée par les entraîneurs en permanence pour éviter le surentraînement.

D'autre part, le contenu des entraînements en sollicitations anaérobies, en exercices intermittents de courtes durées et en forces explosives était beaucoup plus intéressant en volume et augmentait progressivement au cours de la saison plus chez les sprinteurs que chez les autres groupes de sportifs. Les programmes intenses de musculation de 3 à 4 fois par semaine chez les sprinteurs comprenaient plus d'exercices bilatéraux sur les jambes (pressage des jambes) et des exercices pour les principaux groupes musculaires du tronc et du haut du corps avec des tractions latérales, des squats/demi-squats et des développés couchés.

2. OUTILS ET VARIABLES MESUREES

2.1. Electromyographie et mesure du réflexe de Hoffmann (H) et de l'onde motrice (M)

Grace à l'électromyographe "Neuropack 2, Nihon Kohden, Japon, 1999", nous avons enregistré le réflexe H du soléaire par stimulation électrique percutanée du nerf sciatique à l'aide d'une cathode dans le creux poplité interne au niveau de la jambe dominante au moyen de chocs rectangulaires de largeur 1 ms à la fréquence de 0,3 Hz grâce à une électrode à main. La réponse est recueillie à l'aide d'électrodes de surface placées sur la ligne médiane, l'une juste au-dessous de la masse des jumeaux, l'autre 5 cm plus bas (voir photo 1). L'enregistrement est amplifié et visualisé sur écran et sur film polaroid.

Aux faibles niveaux de stimulation, les fibres afférentes primaires d'origine fusoriale (afférences Ia) se propageant vers la moelle épinière sont préférentiellement stimulées en raison de leurs propriétés intrinsèques et leur plus grand diamètre. Quand l'activité de ces afférences Ia est suffisante pour provoquer la dépolarisation du terminal pré-synaptique, les neurotransmetteurs sont libérés dans la fente synaptique de la synapse Ia- α MN, provoquant des potentiels post-synaptiques excitateurs qui sont capables de dépolariser les α MN par la libération d'acétylcholine à la jonction neuromusculaire ce qui génère la contraction du muscle soléaire et l'apparition du tracé d'H-reflex sur l'écran. En continuant d'augmenter l'intensité du stimulus, plus de fibres afférentes Ia sont stimulées, ce qui entraîne l'activation de plus de α MN et l'augmentation de l'amplitude du réflexe H jusqu'à atteindre sa valeur maximale (H max). En poursuivant l'augmentation de l'intensité de la stimulation on enregistre progressivement la diminution de son amplitude jusqu'à sa disparition avec

l'apparition progressive de l'onde motrice M jusqu'à atteindre sa valeur maximale (M max) qui correspond à la mise en jeu de toutes les unités motrices du muscle (figure 25).

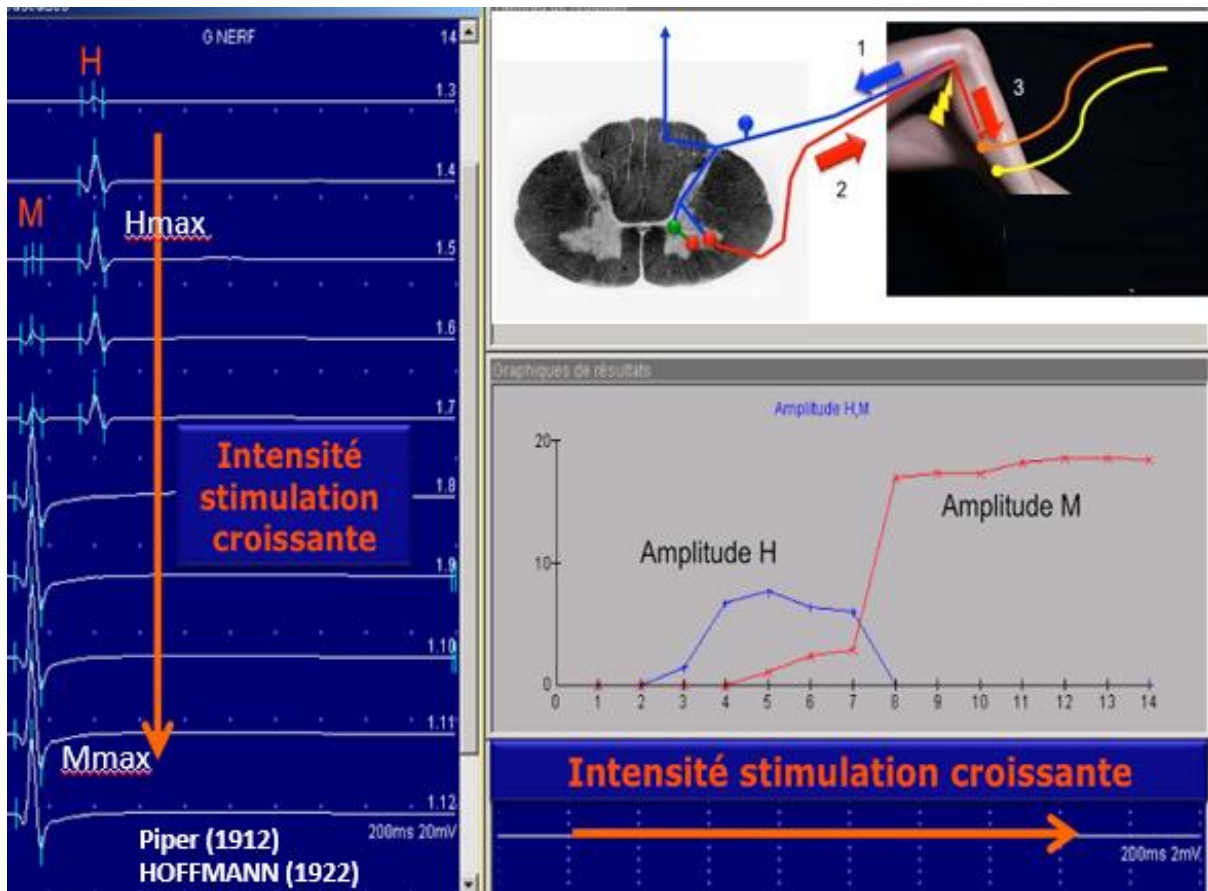


Figure 25: Exemple de réponses électromyographiques (EMG) du muscle soléaire d'un sujet à une stimulation du nerf tibial d'intensités variables. Les intensités de courant de faible intensité étaient suffisantes pour ne stimuler que les fibres les plus grosses du nerf tibial, produisant une réponse EMG avec une latence d'environ 40 millisecondes - l'onde H. Des intensités plus élevées activaient également les axones des nerfs moteurs plus petits, produisant une réponse EMG avec une latence d'environ 10 millisecondes - l'onde M. (John N Howel, *Le journal de l'association américaine d'ostéopathie*, septembre 2006, vol. 106, 537-545.)
source : <http://jaoa.org>

Sachant que Hmax représente l'activité de toutes les unités motrices type (I) (Goulart F, 2000), et Mmax est l'activation maximale du pool des α MN en entier (Goulart F, 2000), on a calculé le taux ($H_{max}/M_{max} \times 100$) afin de quantifier les éventuelles variations du type lent par rapport au recrutement sommatif de l'ensemble des motoneurones.

Nos mesures, effectuées durant septembre, ont concerné tous les sportifs. Chaque sujet a participé à une séance matinale (entre 9h et 11h) de laboratoire au service de neurophysiologie du CHU de Rabat, les sujets n'ayant fait aucun effort durant les heures précédant l'examen. Le réflexe de Hoffmann (H) et l'onde motrice (M) du soléaire ont été mesurés au repos, dans une position semi allongée qui respectait les angles articulaires qui selon Hugon (1973) (Buchthal F, 1970) sont les plus favorables à l'obtention des réflexes recherchés : 120° pour le genou et 90° pour la cheville selon la technique mise au point par Paillard (1955). Quelques essais ont été effectués sur la jambe droite du participant afin de le familiariser avec le dispositif de stimulation. Un soin particulier a été pris pour surveiller la posture des sujets qui ont été invités à se concentrer sur la tâche et à ne pas modifier leur posture.

2.2. Mesure de la puissance musculaire des jambes

Le test de saut vertical est, depuis très longtemps, le plus utilisé afin de déterminer la puissance des membres inférieurs. Ainsi, pour quantifier la pliométrie, Asmussen (1974) était le premier à proposer l'utilisation de trois tests : "squat jump" (SJ), "contre mouvement jump" (CMJ) et "drop jump" (DJ).



Figure 26: Mesure des hauteurs par détente (SJ squat jump, et CMJ contre mouvement jump) et le temps de contact avec le sol par (DJ, drop jump) grâce au tapis de BOSCO, Professeur Andrea Lino, source: <http://www.lemieuxetre.chf>

Nous avons donc mesuré le SJ, le CMJ, l'indice de puissance (IP) et le temps de contact avec le sol après rebondissement.

A l'aide du tapis de Bosco, qui est un tapis de chronométrage numérique relié par un câble à deux barres infrarouges, nous avons mesuré le squat jump (SJ) et le contre mouvement jump (CMJ) (figure 26). Il s'agit d'une mesure indirecte de la puissance des jambes, puisqu'il mesure principalement le temps d'envol et le temps de contact avec le sol, à partir desquels est estimée la hauteur de saut. La précision et la fiabilité de la mesure est élevée à très élevée.

Toutes les mesures ont suivi les enregistrements électromyographiques après un échauffement sans étirements (quelques essais préliminaires ont été nécessaires pour familiariser les participants avec le tapis).

Pour le squat jump (SJ), le sportif commence le test en position fléchie à 90° (articulation du genou) pour effectuer une "poussée" maximale vers le haut. Les mains sont sur les hanches pour éviter une participation des bras.

Pour le saut avec contre mouvement jump (CMJ), le sportif est libre de plier ses jambes et de réagir en poussant. Aujourd'hui il est constaté que ce test permet de mesurer la capacité à développer de la force dans un temps plus long que pour le squat Jump. La phase d'amortissement permet d'avoir plus de temps pour développer la force.

Grâce à ces deux types de sauts nous avons calculé l'Indice de Puissance (IP)= CMJ-SJ. Les sportifs avec une grande différence sont capables d'une grande puissance de jambes sur un temps plus long. Inversement, ceux qui ont un bon squat-Jump et une différence faible sont considérés comme « explosifs » car aptes à développer beaucoup de force dans un peu du temps (Monoem Haddad, 2008). Pour la mesure du temps de contact avec le sol, le sportif se laisse tomber après un saut CMJ sur le tapis à partir d'un banc pour rebondir les mains sur la hanche (Drop Jump).

2.3. Mesure de la force maximale des soléaires

Concernant la force maximale du soléaire, toutes les mesures ont été effectuées par un dispositif de musculation approprié après quelques minutes de récupération après les sauts. Pour cela nous avons procédé par des haltères posés sur les cuisses du sportif et soulevées par les pointes du pied (position assise avec mains croisées sur la poitrine) (figure 27).



Evaluation prédictive de la charge maximale:

La charge maximale estimée: formule de BRZYCKI

Estimer la force maximale à partir de répétitions sous maximales.

$$\text{Charge maximale (1RM)} = \frac{\text{Charge Optimale}}{1,0278 - (0,0278 \times \text{Nbre de repet})}$$

Avantages:

- Estimation rapide de la charge maximale en toute sécurité.
- Approche de la séance test facilitée.

Inconvénients:

- Plus le nombre de répétitions est important, plus l'estimation est approximative.
- Ne mesure pas le potentiel de force maximale d'un athlète.

Figure 27 : Dispositif et mesure prédictive de la force maximale des jambes

Si l'athlète parvient à faire deux répétitions, la charge est trop légère. S'il n'arrive même pas à décoller la charge ou reste coincé au cours du mouvement, c'est qu'elle est trop lourde. Quand toutes les unités motrices des muscles soléaires sont activées, c'est à ce moment qu'il développe sa force maximale ce qui lui permet de réaliser son 1RM et donc pousser la charge considérée comme maximale.

2.4. Analyse statistique

Toutes les données ont été testées pour la distribution normale par un test de Kolmogorov-Smirnov et toutes les comparaisons intergroupes ont été évaluées en utilisant une ANOVA. Pour l'analyse des comparaisons, le test post-hoc Scheffe a été utilisé lorsqu'ANOVA était significative. La signification statistique a été fixée à p <0,05 pour toutes les comparaisons. Les résultats sont indiqués en tant que moyennes et SEM (erreur standard moyenne) dans le texte et dans les tableaux.

II. ETUDE 1 : TYPE DE PRATIQUE SPORTIVE ET NIVEAU D'EXITABILITE DES MOTONEURONES

1. RESULTATS

Nous tenons à signaler d'abord qu'aucune différence significative n'a été observée entre les groupes pour les caractéristiques anthropométriques mesurées chez les sprinteurs (âge, 24,07 ± 0,42 ans, taille, 172,6 ± 1,63 cm, poids, 66,92 ± 0,99 kg), chez les athlètes demi-

fond (âge, $23,57 \pm 0,30$ ans; taille, $178,29 \pm 0,68$ cm, poids, $61,28 \pm 0,89$ kg), chez les nageurs (âge, $20,64 \pm 0,45$ ans; taille, $175,29 \pm 1,86$ cm, poids, $67,92 \pm 1,46$ kg) ou chez les footballeurs (âge, $21,35 \pm 0,38$ ans; taille, $172,36 \pm 1,69$ cm, poids, $71,78 \pm 2,06$ kg).

Tableau 3 : Moyennes des variables et comparaison multiple entre les 4 groupes de Sportifs (S : sprinteurs, D : demi-fond, F : footballeurs, N : nageurs longue distances, M : moyenne arithmétique, Diff M : différence des moyennes, SEM : erreur standard Moyenne -anova bilatérale- * différence des moyennes significative (P <0,05).)

Variables	Moyennes M \pm SEM		Comparaisons intergroupes Diff M \pm SEM		
Hmax (mv)	S	$3,37 \pm 0,41$	S	D	$2,30 \pm 0,52^*$
				N	$4,64 \pm 0,52^*$
	D	$5,67 \pm 0,47$	D	F	$3,05 \pm 0,52^*$
	F	$6,42 \pm 0,25$		N	$2,34 \pm 0,52^*$
N	$8,01 \pm 0,26$	N	F	$0,75 \pm 0,52^*$	
Mmax (mv)	S	$15,5 \pm 1,51$	S	D	$0,34 \pm 1,60$
				N	$3,77 \pm 1,60$
	D	$15,84 \pm 1,26$	D	F	$3,31 \pm 1,63$
	F	$12,05 \pm 1,54$		N	$4,11 \pm 1,60$
N	$11,72 \pm 0,41$	N	F	$3,65 \pm 1,48$	
Hmax/Mmax (%)	S	$21,35 \pm 1,54$	S	D	$14,27 \pm 2,11^*$
				N	$47,37 \pm 2,11^*$
	D	$35,63 \pm 0,73$	D	F	$31,48 \pm 2,15^*$
	F	$52,84 \pm 1,31$		N	$33,10 \pm 2,11^*$
N	$68,73 \pm 2,67$	N	F	$17,21 \pm 2,15^*$	
			F	$15,88 \pm 2,15^*$	

D'autre part, les comparaisons intergroupes par test post-hoc Scheffé des moyennes des paramètres réflexologiques mesurées (Hmax et Hmax/Mmax x100), se sont révélées significatives à (p<0,05) (tableau 3). La valeur moyenne la plus élevée du rapport a été mesurée dans le groupe des nageurs ($68,73 \pm 2,67\%$), orienté intensivement vers l'endurance, ce ratio chez les nageurs s'est avéré plus élevé que celui chez les footballeurs ($52,49\% \pm 1,31\%$), qui à son tour est plus grand que celui des athlètes demi-fond

(35,63±0,73%). Alors que la plus petite valeur moyenne a été observée dans le groupe des sprinteurs (21,35±1,54%) spécialistes des entraînements de type anaérobie (tableau 3).

A signaler que toutes les comparaisons entre les filles et les garçons des 4 groupes de sportifs se sont avérées non significatives (Tableau 4).

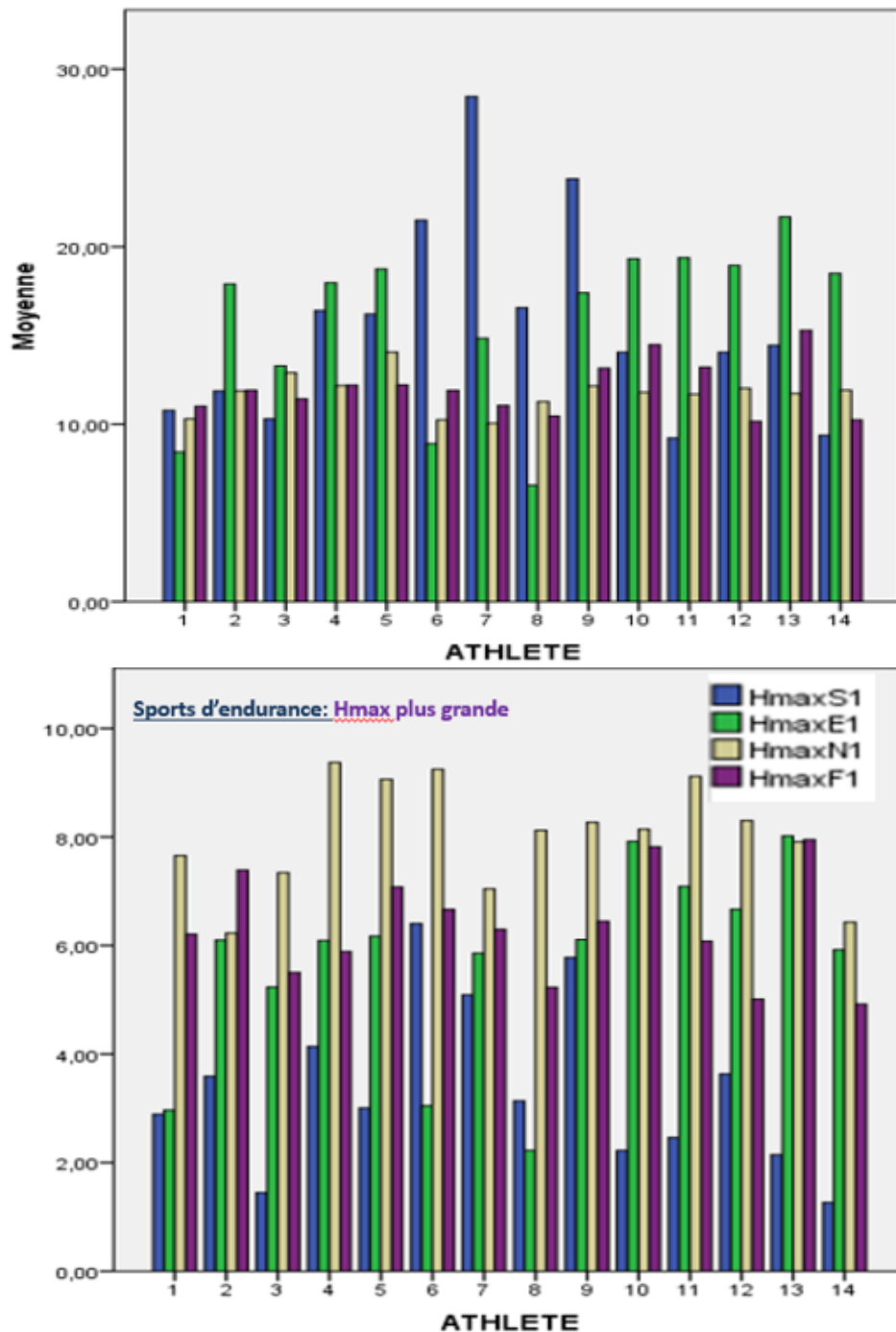
Tableau 4 : Moyennes des variables des filles et des garçons et différences filles/garçons dans les 4 groupes de sportifs. (F : fille, G : garçon, Hmax : amplitude maximale de l'onde H du soléaire, Mmax : amplitude maximale de l'onde M du soléaire, M : moyenne arithmétique, Diff : différence moyenne, SEM : erreur standard moyenne, * différence des moyennes significative (P <0,05)).

Variables	Groupes											
	Sprinteurs			Demi-fond			Footballeurs			Nageurs		
	F M±SEM	G M±SEM	Diff M±SEM F/G	F M±SEM	Diff M±SEM F/G	Diff M±SEM F/G	F M±SEM	G M±SEM	Diff M±SEM F/G	F M±SEM	G M±SEM	Diff M±SEM F/G
Hmax (mv)	3,21± 0,54	3,53± 0,65	0,32± 0,69	6,66± 0,39	1,97± 0,69	1,97± 0,69	8,02± 0,33	8,01± 0,38	0,02± 0,72	6,25± 0,54	6,34± 0,31	0,08± 0,84
Mmax (mv)	14,14± 1,88	16,86± 2,41	2,71±2,18	18,25± 0,97	1,97± 0,69	1,97± 0,69	11,57± 0,72	11,81± 0,23	0,24± 2,28	11,94± 0,79	12,08± 0,49	0,13± 2,66
Hmax/Mmax (%)	22,26± 2,05	20,45± 2,42	1,80± 3,06	36,57± 1,11	1,88± 3,06	1,88± 3,06	68,20± 1,6	52,33± 4,14	1,48± 3,20	52,54± 2,84	38,49± 1,48	0,20± 3,73

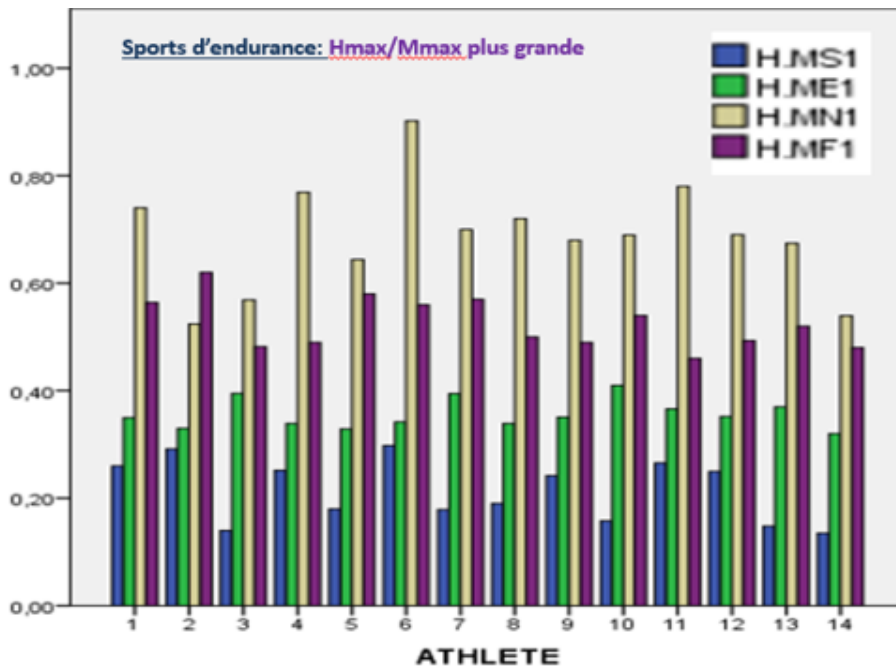
2. DISCUSSION

Toutes les comparaisons intergroupes des moyennes (Hmax et Hmax/Mmax) rapportés dans le tableau 3 se sont révélées significatives à (p<0,05) ce qui approuve les constatations avec les moyennes individuelles (voir graphique 1 et 2), que la moyenne de Hmax est plus grande chez les nageurs de longues distances spécialistes en endurance et plus petite chez les sprinteurs plus habitués à l'entraînement anaérobie explosif. Ainsi, les rapports calculés Hmax/Mmax sont d'autant plus grandes chez les sujets pratiquant des sports exigeant plus d'entraînements en endurance comme c'est le cas des nageurs par rapport aux footballeurs ou aux athlètes de demi-fond et plus faibles chez les sprinteurs qui demandent plus de sollicitations musculaires avec plus de force et d'explosivité et plus d'exercices puissants de courtes durées. Ces résultats permettent donc de déduire que, à l'opposé de l'entraînement aérobie qui fait augmenter Hmax et Hmax/Mmax, l'entraînement anaérobie les

fait diminuer, ce qui indique une association entre l'endurance et la capacité de recruter une grande proportion de l'ensemble du parc moteur (α MN) en réponse à la volée afférente Ia.



Graphique 1 : Moyennes individuelles de l'amplitude maximale H (Hmax (mv)) et de l'onde M (Mmax) du soléaire chez les 14 sportifs de chacun des 4 groupes de sportifs (S : sprinteurs, E : demi-fond, F : footballeurs, N : nageurs, 1 : mesures au début de la saison sportive).



Graphique 2 : Moyennes individuelles (sur 3 mesures) des rapports Hmax/Mmax (%) du soléaire chez les 14 sportifs de chacun des 4 groupes.

En fait, les changements enregistrés dans le réflexe H (graphiques 1et 2) par les charges dues aux différents entraînements physiques dans différents sports trouvent logiquement leur interprétation-comme le suggère aussi la littérature-par cette modification au niveau spinal du lien direct entre les afférences Ia et les motoneurones α (α MN). En effet, l'inhibition présynaptique modifie la libération de neurotransmetteurs au niveau de la synapse Ia-(α MN) et peut se traduire par une diminution du réflexe H (Nielsen J., 1993). En outre, le type de contrôle présynaptique peut changer avec le type de sport pratiqué comme le montre les résultats des comparaisons intergroupes révélés très significatifs (tableau 3).

Ces résultats permettent de soutenir l'idée que les faibles valeurs de Hmax/Mmax observées chez les sportifs non endurants (sprinteurs) par rapport aux sportifs endurants (nageurs, athlètes demi-fond) ne peuvent pas être explicitement interprétés que par l'inhibition réflexe du pool de motoneurones, nous envisageons également la possibilité d'une adaptation des propriétés intracellulaires (intrinsèques) des α -motoneurones, qui peut être liée à la fois à plus d'inhibition pré-synaptique conduisant à un décrétement des influx excitateurs provenant des afférences Ia (Macefield G, 1991), probablement aussi à plus de diminution d'excitabilité du pool motoneurone α (α MN) comme le pensent d'autres études plus récentes (Phadke CP,

2009). Et peut-être même au type de neurotransmetteur libéré au niveau de la synapse Ia- (α MN) qui se traduit par une inhibition du réflexe H.

3. CONCLUSION

Cette étude a montré que les valeurs des réflexes H du soléaire sont plus petits chez les sportifs pratiquant des entraînements à dominance explosive (sprinteurs). Cette variation, comme en témoignent les comparaisons des moyennes (tableau 3) pourrait être associée aux types d'entraînements pré-acquis et le niveau de chargement des muscles des membres inférieurs en explosivité, force et puissance.

III. ETUDE 2 : SOLLICITATION EXCENTRIQUE ET NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES

Sachant que le réflexe de Hoffmann est considéré comme une estimation de l'excitabilité des motoneurones alpha (α MN) et de l'inhibition présynaptique, et afin de comprendre dans quelle mesure le système nerveux peut s'adapter à des séances différentes d'étirement sportif, nous avons choisi d'étudier la plasticité neuronale spinale chez les deux différents types d'athlètes (sprinteurs et athlètes de fond et demi-fond) et de déterminer si le type d'étirement (statiques passifs, statiques actifs et activo-dynamiques) affecte les réponses H et M et permet des modifications myotypologiques et des adaptations neuronales et musculaires spécifiques immédiates.

Cette étude pourrait apporter des informations utiles pour mieux personnaliser les programmes et contenus des entraînements et suivre la progression des sportifs dans leurs spécialités.

On a considéré les mesures des variables électromyographiques et neuromusculaires de la première étude comme mesures avant étirements, puis nous avons effectué les mesures des mêmes variables chez chaque athlète, à trois moments différents dans la semaine. A chaque fois, on a mesuré les détente verticales « SJ et CMJ » puis la force maximale « 1RM » des jambes juste après l'exploration électromyographique du soléaire qui a été réalisée immédiatement après échauffement intégrant à chaque fois une séance différente d'étirements de 30 minutes (statiques passifs puis statiques actifs et enfin activo-dynamiques).

Chacune des 3 types de séances est composée de 3 séries de 10 étirements du soléaire de 15 secondes, entrecoupés de pauses de 5 secondes, répétées 3 fois de suite.

La séance statique passive (SP) a été réalisée jusqu'au seuil maximal de douleur tolérable par le sportif sans que l'antagoniste (jambier antérieur) soit contracté. Celle statique actif (SA) a été effectuée par le sportif tout seul par contraction de l'antagoniste (jambier antérieur) analogue à un effort excentrique. Enfin l'activo-dynamique (AD) a été exécutée sur un banc de stretching combinant l'allongement du muscle soléaire en deçà de sa longueur maximale par contraction isométrique, enchaîné avec un relâchement puis un travail dynamique de saut.

1. RESULTATS

En ce qui concerne la comparaison des moyennes des variables entre les deux mesures avant et après étirements dans le même groupe (tableau 5) et entre les deux groupes pour chaque type d'étirement (tableau 6), nous avons remarqué que toutes les différences s'avèrent significatives au risque de 5% pour toutes les variables sauf pour Mmax et SJ.

Tableau 5 : Comparaison multiple entre les moyennes des variables (prè) et (post) étirement chez les deux groupes d'athlètes séparément. sa : mesures après étirements statiques actifs, sp : mesures après étirements statiques passifs, ad : mesures après étirements actifs dynamiques, M : moyenne arithmétique, Diff.M : différence moyenne, SEM : erreur standard moyenne, anova bilatérale, * différence des moyennes significative (P <0,05).

Variable	Sprinteurs (Diff.M ± SEM)			Demi-Fond (Diff.M ± SEM)		
	Pré-sp	Pré-sa	Pré-ad	Pré-sp	Pré-sa	Pré-ad
Hmax (mv)	3,37±0,5*	3,37 ±0,5*	0,12±0,5*	5,67 ±0,5*	5,67±0,5*	0,48±0,5*
Mmax (mv)	0,76 ±1,6	0,37±1,6	-0,31±1,6	1,93±1,6	1,35±1,6	0,27±1,6
Hmax/Mmax (%)	21,4±2,1*	21,4±2,1*	-0,1±2,1*	35,6±2,1*	35,6±2,1*	2,6±2,1*
SJ(cm)	4,33± 2,4	1,40± 2,4	1,02± 2,4	3,39± 2,4	2,12± 2,4	1,38± 2,4
CMJ(cm)	1,57±2,6*	-2,4±2,6*	-4,45±2,6*	10,31±2,6*	8,63±2,6*	7,43±2,6*
IP(cm)	-2,83±0,60*	-3,82±0,60*	-5,5±0,60*	6,92±0,60*	6,52±0,60*	6,1±0,60*
CT(s)	-0,03±0,01*	-0,02±0,01*	-0,004±0,01*	-0,10±0,01*	-0,05±0,01*	-0,03±0,01*
Fmax(Kg)	3,07±5,97*	1,78±5,97*	0,93±5,97*	5,21±5,97*	4,50±5,97*	2,21±5,97*

Les résultats recueillis des comparaisons significatives illustrées par le tableau 5 ont permis de remarquer d'une part que les valeurs moyennes les plus élevées ont été mesurées avant les séances d'étirements et les plus faibles après intégration des étirements, et de souligner d'autre part une diminution significative à ($P < 0,05$) de la moyenne de la réponse reflexe H avec les étirements AD avec inhibition totale ($H_{max}=0$) chez tous les athlètes endurants et sprinteurs avec les deux types d'étirements SP et SA.

Tableau 6 : Comparaison des types d'étirement. (pré : mesures avant étirements, sa : mesures après étirements statiques actifs, sp : mesures après étirements statiques passifs, ad : mesures après étirements actifs dynamiques, Diff.M : différence moyenne, SEM : erreur standard moyenne, Anova bilatérale,* différence des moyennes significative ($P < 0,05$).

Variable	Sprinteurs/demi-fond (Diff.M \pm SEM)			
	Pré-Pré	sp-sp	sa-sa	ad-ad
Hmax (mv)	-2,30 \pm 0,5*	0 \pm 0,5	0 \pm 0,5	-1,94 \pm 0,5*
Mmax (mv)	-0,34 \pm 1,6	0,83 \pm 1,6	0,64 \pm 1,6	0,24 \pm 1,6
Hmax/Mmax(%)	-14,27 \pm 2,1*	0 \pm 2,1	0 \pm 2,1	-11,42 \pm 2,1*
SJ(cm)	14,91 \pm 2,4*	13,98 \pm 2,4*	15,63 \pm 2,4*	15,27 \pm 2,4*
CMJ(cm)	9,66 \pm 2,6*	18,41 \pm 2,6*	20,70 \pm 2,6*	21,55 \pm 2,6*
IP(cm)	-5,24 \pm 0,6*	4,50 \pm 0,6*	5,10 \pm 0,6*	6,35 \pm 0,6*
CT(s)	-0,03 \pm 0,01*	-0,08 \pm 0,01*	-0,06 \pm 0,01*	-0,06 \pm 0,01*
Fmax(Kg)	13,28 \pm 6,0*	12,428 \pm 6,0*	16,00 \pm 6,0*	14,57 \pm 6,0*
Hmax (mv)	-2,30 \pm 0,5*	0 \pm 0,5	0 \pm 0,5	-1,94 \pm 0,5*

A l'exception des comparaisons des moyennes de Mmax et celles de SJ révélées non significatives, les résultats montrent qu'il y a une diminution significative à ($P < 0,05$) de

toutes les autres moyennes des variables étudiées dans les deux groupes d'athlètes avec les trois types d'étirements par rapport aux moyennes des résultats sans étirement, en effet les étirements SP ont un effet plus remarquable que celui des SA ou celui des AD qui restent les étirements qui ont les effets les moins importants (tableau 6).

Même si par rapport à leurs homologues d'endurance, les sprinteurs produisent toujours (avant et après étirements) plus de forces avec plus de tension et de puissance musculaires, on enregistre quand même chez les deux groupes une diminution des performances en force maximale et en puissance du soléaire: Ces trois types d'étirements rendent leurs jambes moins fortes et moins puissantes avec une diminution de la valeur moyenne des indices de puissances et de celle des forces maximales des soléaires chez les sprinteurs et chez les athlètes d'endurance (tableau 6). De même, ces trois types d'étirements rendent les jambes des sprinteurs moins explosives, moins puissantes, moins réactives et plus lentes en contact avec le sol. Cette lenteur étant plus prononcée chez les athlètes endurants (tableau 6).

2. DISCUSSION

Les résultats ont montré que les trois modalités d'étirements appliquées réduisent drastiquement l'amplitude du réflexe H pendant les minutes qui suivent l'allongement du muscle.

La méthode des étirements statiques passifs (SP) et la méthode des étirements statiques actifs (SA) produisent une inhibition totale des motoneurones (α MN), significativement ($P < 0,05$) plus importante pour ces manœuvres que pour la méthode des étirements actifs dynamiques (DA) avec laquelle l'amplitude maximale du réflexe H n'atteint en moyenne que 3,25mv chez les sprinteurs et 5,19mv chez leurs homologues athlètes d'endurance par rapport aux valeurs de contrôle (pré-test) qui sont respectivement 3,37mv et 5,67mv.

Pour les trois méthodes d'étirement, les performances en force maximale (F_{max}), en détente (SJ et CMJ), en puissance et en explosivité (IP, CT) des soléaires observées chez tous les sportifs sont meilleures avec la méthode DA qu'avec SA ou SP, mais restent significativement ($P < 0,05$) inférieures à celles enregistrées avant étirements, résultats qui concordent avec d'autres études (Kokkonen, 1998 ; Behm, 2016). En outre, on remarque que

ces performances sont d'autant meilleures que la diminution de H_{max}/M_{max} est importante. Sachant que la réponse motrice M témoigne du recrutement de l'ensemble des unités motrices actives et l'inhibition de l'onde H témoigne de la réduction des unités motrices lentes, on comprend bien les meilleures performances grâce à la sollicitation de moins en moins d'unités lentes chez les sprinteurs par rapport aux athlètes endurants.

Sur le plan physiologique, les résultats avec SP et SA permettent de penser que l'étirement lent (ou statique) non seulement évite l'activité contractile réflexe du muscle étiré mais diminue l'excitabilité du pool de motoneurons (αMN) de ce muscle plus avec SP qu'avec SA. Cette réduction d'excitabilité des (αMN) contrôle étroitement le degré d'allongement musculaire. En effet, plus le muscle est allongé plus le recrutement d'unités motrices type lent diminue en premier.

La méthode SP permet une plus grande mobilisation de l'articulation, dans la mesure où elle associe cette inhibition des (αMN) à un étirement passif excessif des composantes élastiques du muscle qui seront plus allongées ; L'application de forces extérieures joue un rôle principal dans les exercices d'étirements passifs. Ils s'effectuent généralement avec l'aide d'un partenaire sans que les antagonistes soient renforcés. Il est souligné que : « lors d'étirements statiques, passifs et lents, 3 structures sont donc sensibles à l'étirement : les structures conjonctives, les structures musculaires et les implications nerveuses ». On assiste ainsi à une réduction maximale de l'intervention du réflexe d'étirement, Il est donc logique de penser que les mécanismes de cette inhibition peuvent être attribués à l'inhibition présynaptique des fibres (Ia) sur les motoneurons via un interneurone inhibiteur (Delwaide PJ. 1973) et aussi aux afférences provenant de l'organe tendineux de Golgi (Eccles, 1957 ; Houk, 1980 ; Pierrot-Deseillini, 1981) et le fuseau neuromusculaire par l'intermédiaire des fibres II (Bianconi, 1964 ; Hutton, 1973).

Dans la méthode statique active (SA), on associe un étirement lent limité par une contraction concomitante du muscle antagoniste. Dans ces conditions, l'excitabilité du pool des (αMN) du soléaire est réduite pendant l'étirement. Il s'agit en réalité d'un processus d'inhibition réciproque mais de moindre ampleur : pendant la contraction du Jambier Antérieur (JA), la décharge de ses fibres la inhibe par des interneurones inhibiteurs, le pool des (αMN) du Soléaire (Tanaka, 1980). Il est donc logique de proposer que dans cette manœuvre SA, la mobilisation articulaire est étroitement contrôlée par la force de contraction du Jambier Antérieur JA, puisque l'intensité de l'inhibition réciproque est liée au degré de

contraction de l'antagoniste (Shindo M, 1984). D'autre part cette hypo-excitabilité des (α MN), consécutive à la contraction isométrique du Jambier Antérieur (JA) résulte probablement aussi de l'influence prolongée des afférences inhibitrices provenant des fibres Ib, en réponse à la tension sur l'organe de Golgi du muscle en contraction et/ou à une inhibition présynaptique des fibres Ia.

Dans la modalité (DA), on peut penser à un schéma analogue à celui de (SA) avec moindre ampleur : moins d'inhibition directe Ia et plus de facilitation Ib.

3. CONCLUSION

La charge choisie de la séance d'étirements (30mn avec 10 secondes pour chaque étirement) influence largement la modification du réflexe H et l'excitabilité des (α MN) ne diminue pas dans les mêmes proportions pour les trois modalités, puisque la réduction de l'excitabilité des (α MN) est probablement très influencée par le type et le niveau de charge de l'étirement en intensité et en durée. Toutefois, la durée optimale de la séance d'étirements pourrait être une bonne piste de recherche.

Sur la base de tout ce qui précède, on pense que le type d'étirement influencent spécifiquement l'excitabilité des neurones moteurs spinaux, raison pour laquelle on pourrait admettre que les effets à long terme ou à court terme influencent les paramètres réflexe H sans avoir un effet significatif sur la réponse motrice M. Ils permettent d'engendrer des changements au niveau synaptique, myotypologique et neuromusculaire affectant le niveau de performance en force, puissance, explosivité et endurance...

IV. ETUDE 3 : ENTRAINEMENT CHRONIQUE ET NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES

Un certain nombre d'études ont montré que l'excitabilité du réflexe H mesurée au repos est plus élevée chez les athlètes entraînés à l'endurance que chez les athlètes moyennement entraînés (Maffiuletti, 2001) et inférieure chez ceux-ci que chez les personnes sédentaires (Casabona, 1990).

Pour ce qui est de l'effet du type d'entraînement sur l'amplitude du réflexe H, Aagaard et al. (2002) ont observé une augmentation de 20% de l'amplitude du réflexe H chez des sujets ayant suivi un programme d'entraînement d'endurance de 14 semaines. En outre, Vila-

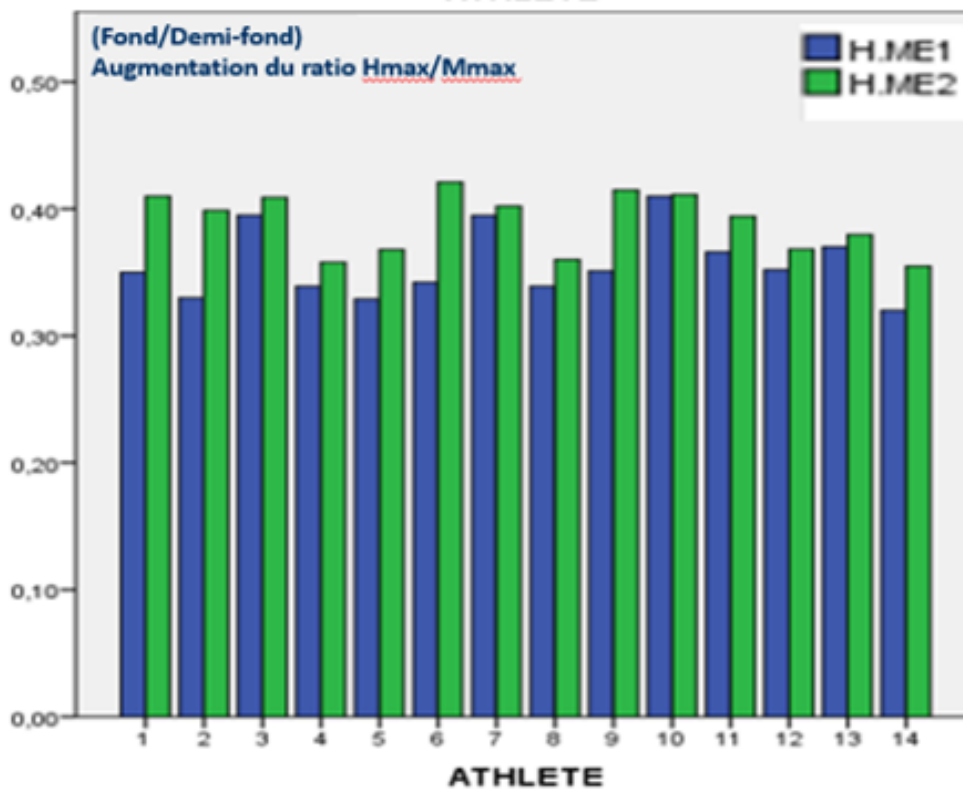
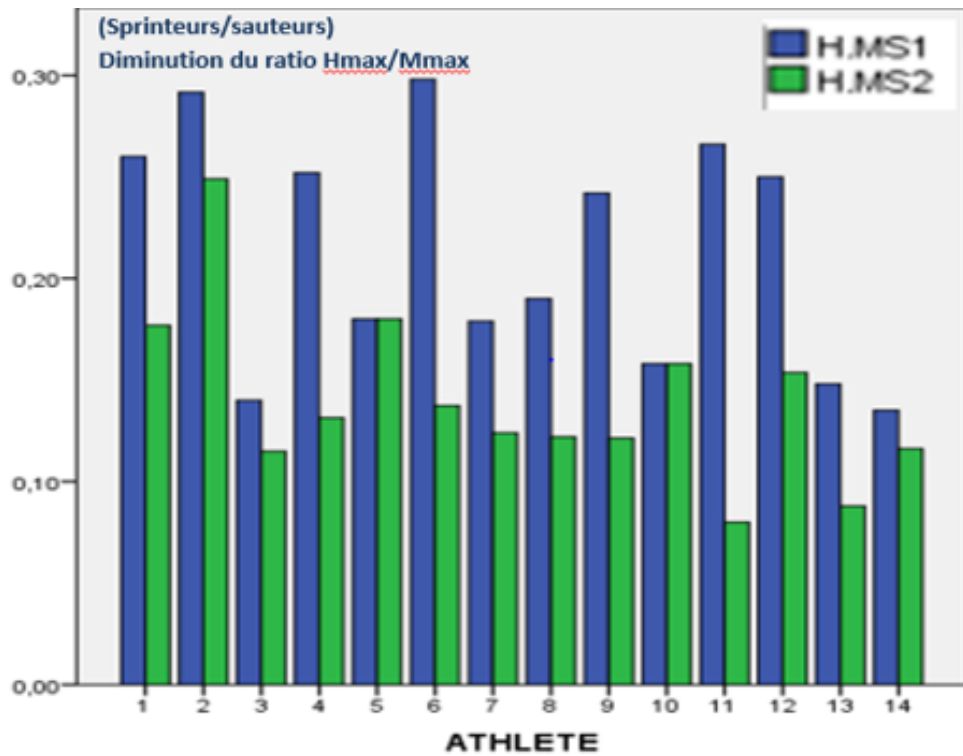
Cha et al. (2012) ont comparé l'effet de l'application d'un programme d'entraînement en force et en endurance de 3 semaines et ont constaté que l'amplitude du réflexe H, pour le muscle Soléaire a augmenté de manière significative chez les personnes qui ont participé au programme d'entraînement de force, et non retrouvée d'ailleurs chez les personnes ayant suivi un entraînement d'endurance. Ils déduisaient donc que la réponse du réflexe H varie en fonction du type d'activité sportive et qu'elle pourrait être dans ce sens indicateur représentative de l'effet d'un type de programme d'entraînement sur les performances des athlètes afin de le valider ou de l'améliorer le cas échéant.

D'autres part, des mesures ont été réalisés dans quelques études d'entraînement en force ou en endurance et n'ont rapporté pas de changements du réflexe H (Burke, 1999), tandis que d'autres ont témoigné d'augmentations des réponses H-réflexes. Ces différences de mesures peuvent être attribuées à divers protocoles et / ou approches méthodologiques et cette hétérogénéité des résultats était probablement due à des différences dans le niveau de condition physique du sujet et / ou à son implication dans d'autres activités sportives (Burke, 1999).

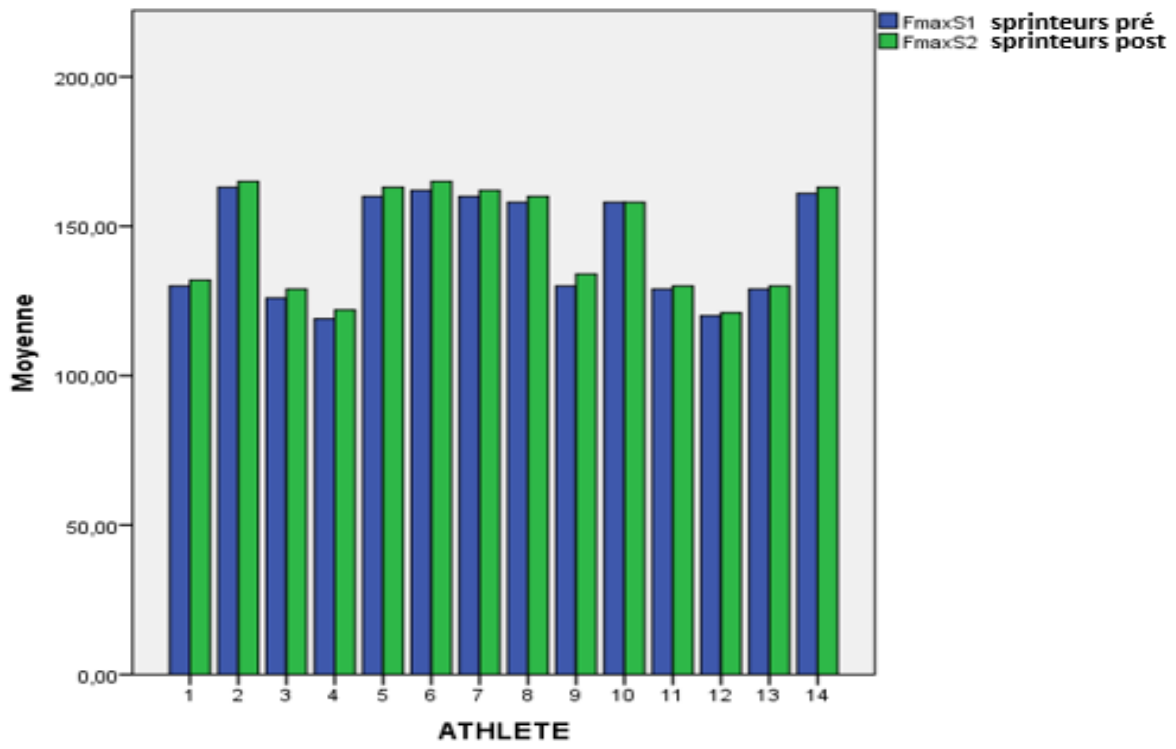
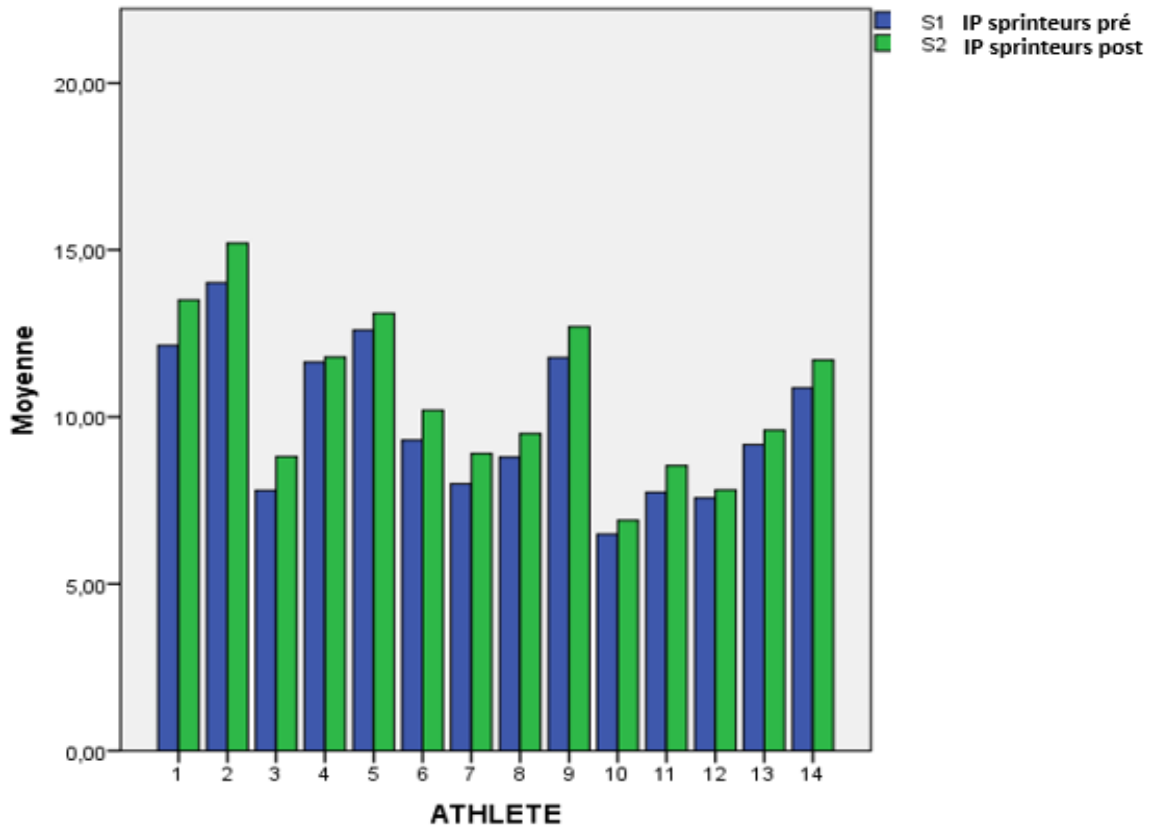
Toutes ces observations suggèrent que les circuits réflexes spinaux s'adaptent spécifiquement aux demandes et exigences physiques de l'entraînement. Cependant, les résultats de ces études doivent être interprétés avec prudence, car il n'est pas possible de dissocier complètement le rôle du génome dans les adaptations réelles induites par l'entraînement (Zehr, 2002).

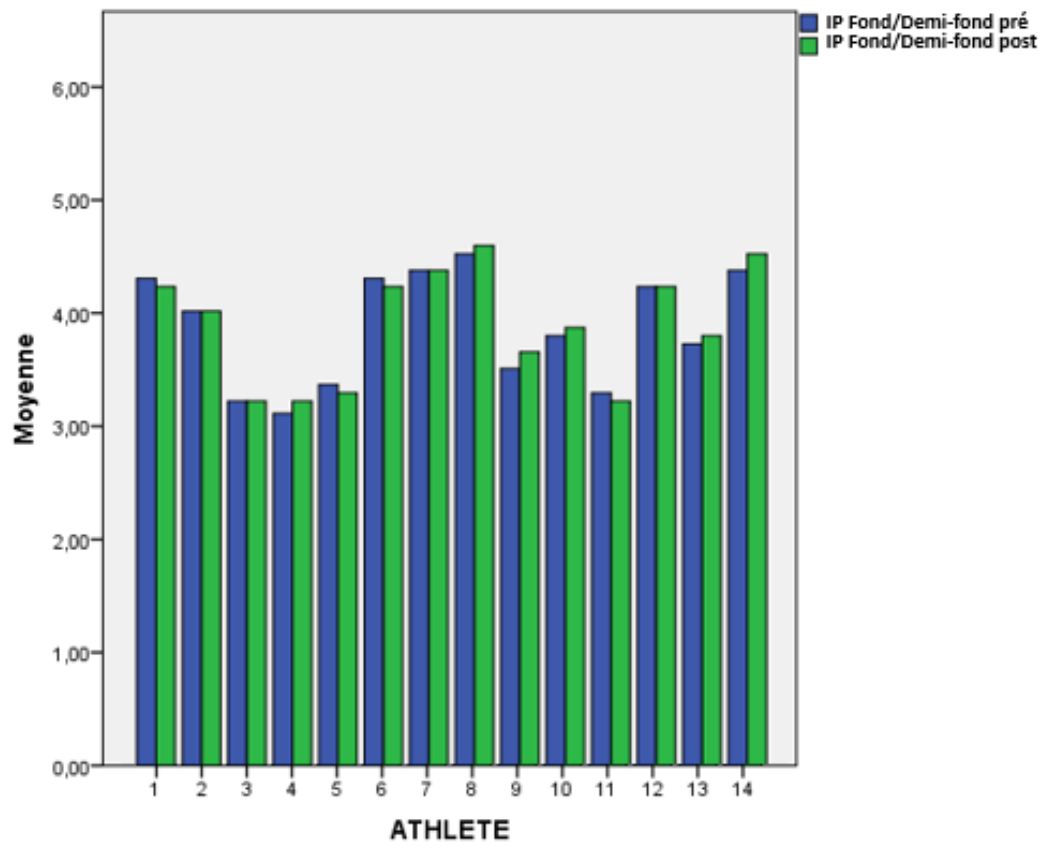
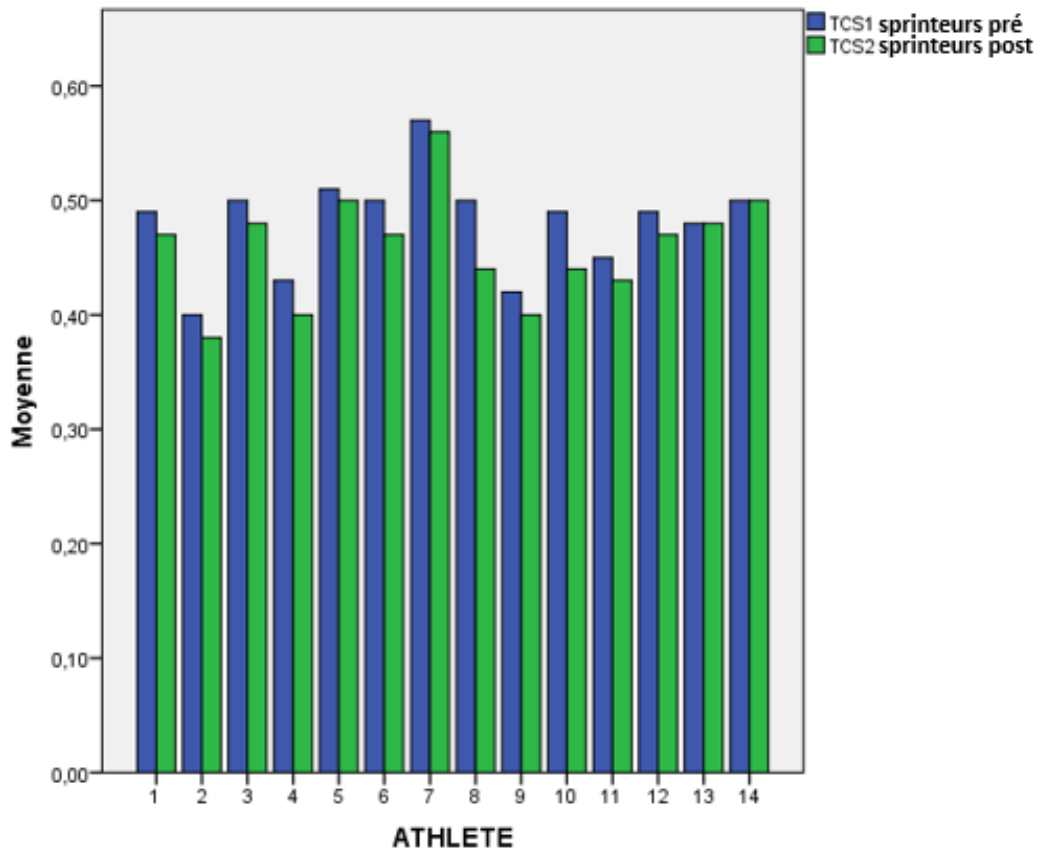
1. RESULTATS

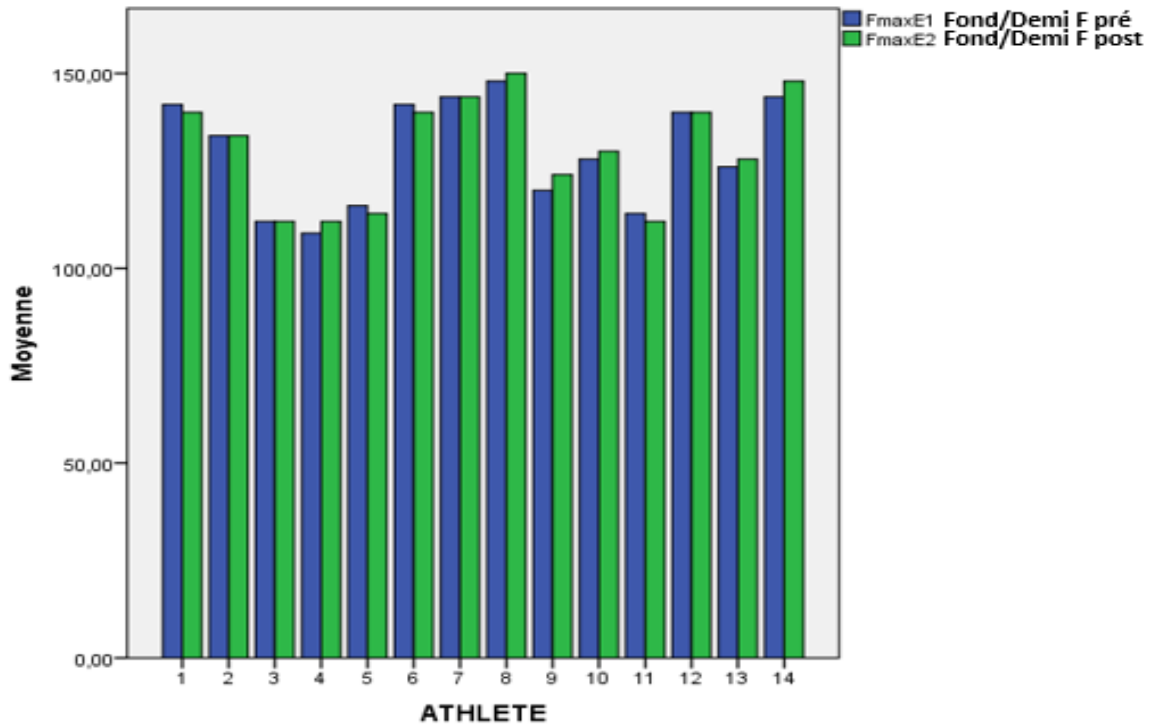
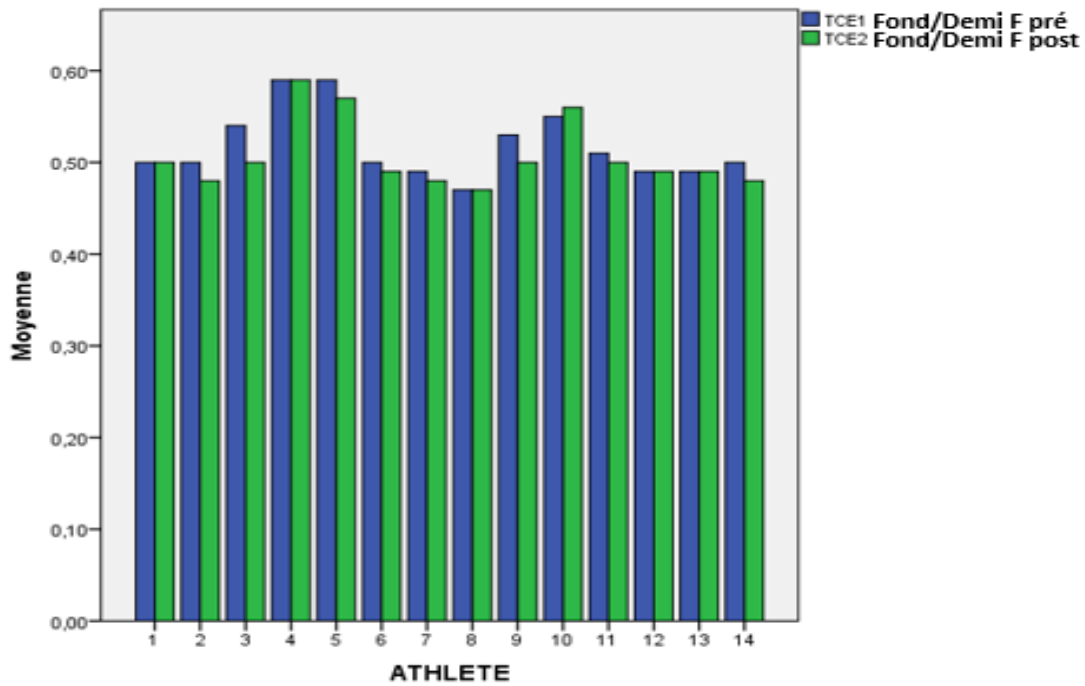
L'analyse des moyennes individuelles (graphiques 3 et 4) et des différences des moyennes rapportées dans le tableau 7, avant et après 10 mois d'entraînement dans les deux groupes d'athlètes a permis de souligner que toutes les différences ont été significatives ($p < 0,05$) et que les deux types d'entraînements ont eu des effets opposés sur les paramètres.



Graphiques 3: Moyennes individuelles de H_{max}/M_{max} chez les sprinteurs (S) et les spécialistes en demi-fond (E) : avant (1) et après (2) la saison sportive.







Graphiques 4 : Moyennes individuelles des paramètres neuromusculaires du soléaire (IP, TC, Fmax) chez les 14 sprinteurs/sauteurs et les 14 spécialistes en demi-fond/fond (S : sprinteur/sauteur, E : fond/demi-fond, 1 : mesures au début de la saison sportive, 2 : mesures après une saison d'entraînement de 10 mois).

Ainsi, après cette période d'entraînement, Hmax et Hmax/Mmax ont vu leurs valeurs moyennes diminuées significativement, respectivement de $(1,21 \pm 0,24 \text{mv})$ et $7,40 \pm 1,50\%$,

$p < 0,05$) dans le groupe des sprinteurs, et augmentées de $(0,39 \pm 0,62 \text{mv}$ et $3 \pm 0,90\%$, $p < 0,05$) dans le groupe demi-fond. Cependant, M_{max} a augmenté significativement dans les deux groupes respectivement de $(0,14 \pm 0,23 \text{mv}$ et $0,13 \pm 1,59 \text{mv}$, $p < 0,05$) (tableau 7).

Pour les détenteurs (SJ et CMJ), nous avons enregistré des augmentations significatives de leurs valeurs moyennes, plus dans le groupe des sprinteurs que dans le groupe des athlètes demi-fond, chez qui l'IP a augmenté significativement de $(0,73 \pm 0,09 \text{cm}$, $p < 0,05$) après 10 mois d'entraînement, par rapport à celui des sprinteurs qui a vu une réduction significative de sa valeur moyenne de $(0,64 \pm 0,23 \text{cm}$, $p < 0,05$) témoignant d'une meilleure explosivité.

Cette explosivité caractérisée par la rapidité du mouvement en contact avec le sol lors de l'exécution du SJ a vu sa valeur moyenne augmenter significativement chez les sprinteurs plus que chez les athlètes demi-fond $(0,02 \pm 0,04 \text{s}$ vs $0,01 \pm 0,03 \text{s}$, $p < 0,05$) (tableau 7).

Tableau 7 : Différences des moyennes des variables entre le début et la fin de la saison sportive et comparaison entre le groupe des sprinteurs(S) et athlètes de demi-fond(D) : athlètes de demi-fond, avant la saison d'entraînement de 10 mois (prè) et après(post), M : moyenne arithmétique, Diff.M : différence des moyennes, SEM : erreur standard moyenne, * différence des moyennes significative ($P < 0,05$)).

Variables	Athlètes Sprinteurs (S)		Athlètes Demi-fond (D)		Diff.M±SEM entre (S) et (D)	
	M±SEM (Pré)-S1	M±SEM (Post)-S2	M±SEM (Pré)-D1	M±SEM (Post)-D2	Entre S1 et D1 (Pré)	Entre S2 et D2 (Post)
Hmax (mv)	3,37±0,41	2,16±0,20*	5,67±0,47	6,07±0,48*	2,30±0,62*	3,91±0,52*
Mmax (mv)	15,50±1,51	15,64±1,46*	15,84±1,26	15,97±1,15*	0,34±1,97	0,33±1,86
Hmax/Mmax	21,35±1,54	13,95±1,14*	35,63±0,73	38,93±0,62*	0,14±0,01*	0,24±0,01*
SJ(cm)	58,39±0,99	61,77±1,17*	43,48±1,89	45,36±1,99*	14,91±2,48*	16,41±2,82*
CMJ(cm)	63,00±1,03	65,73±1,05*	53,33±1,96	55,95±2,08*	9,66±2,64*	9,78±2,83*
IP =CMJ-SJ	4,60±0,20	3,95±0,27*	9,85±0,61	10,58±0,65*	5,24±0,64*	6,63±0,70*
CT (s)	0,48±0,011	0,45±0,04*	0,51±0,01	0,50±0,01*	0,48±0,011	0,45±0,04*
Fmax (kg)	143,21±4,82	145,28±4,82*	129,92±3,67	130,57±3,70*	143,21±4,82	145,28±4,82*

Les comparaisons dans le tableau 7 montrent aussi que les performances en force maximale des jambes sont restées meilleures chez les sprinteurs que chez les athlètes demi-fond au début $(143,21 \pm 4,82 \text{Kg}$ vs $145,28 \pm 4,82 \text{Kg}$) comme après les 10 mois d'entraînement

(129,92±3,67Kg vs 130,57±3,70Kg), et qu'il y a eu augmentation significative de la moyenne générale de cette force dans chacun des deux groupes d'athlètes, sprinteurs et demi-fond respectivement de (2,07±0,28Kg et 0,64±0,58Kg).

En ce qui concerne la comparaison des valeurs moyennes intergroupes, excepté la non significativité des différences pour Mmax, nous avons remarqué que toutes les différences appariées s'avèrent significatives au risque de 5% pour toutes les autres variables (tableau 7).

Enfin, les corrélations multiples entre les paramètres physiques (SJ, CMJ, IP, CT, Fmax) et les paramètres électromyographiques (Hmax, Hmax/Mmax) pour toutes les mesures des deux groupes d'athlètes, ont révélé que toutes les associations bilatérales sont significatives (p<0,01), négatives entre (SJ, CMJ, Fmax) et (Hmax, Hmax/Mmax) (r : négatif ; p<0,01) et positives entre (IP, CT) et (Hmax, Hmax/Mmax) (r : positif ; p<0,01). Cependant, aucune association bilatérale significative n'a été observée entre Mmax et les variables physiques au niveau 0,01(tableau 8).

Tableau 8 : Corrélations entre les paramètres électromyographies et les variables physiques pour toutes les mesures effectuées avant et après la saison sportive chez les athlètes sprinteurs et de demi-fond (Hmax : amplitude maximale de l'onde H, Mmax : amplitude maximale de l'onde M, SJ : squat jump, CMJ : contre mouvement jump IP : indice de Puissance du soléaire, Fmax : force maximale du soléaire, N : nombre de mesure, Sig : p de significativité de la corrélation).
 **. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).
 *. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

Variables		SJ(cm)	CMJ(cm)	IP(cm)	CT(s)	Fmax(Kg)
Hmax(mv)	r de Pearson	-0,742**	-0,674**	0,598**	0,437**	-0,385**
	Sig bilatéral	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003
	N	56	56	56	56	56
Mmax(mv)	r de Pearson	-0,186	-0,235	0,003	0,276*	-0,013
	Sig bilatéral	0,169	0,081	0,982	0,040	0,924
	N	56	56	56	56	56
Hmax/Mmax(%)	r de Pearson	-0,759**	-0,600**	0,811**	0,352**	-0,370**
	Sig bilatéral	0,000	0,000	0,000	0,008	0,005
	N	56	56	56	56	56

Enfin, nous signalons qu'aucune différence significative des moyennes de toutes les variables n'a été relevée ni lors des comparaisons entre les athlètes filles et garçons, ni lors des comparaisons filles et garçons entre le début et la fin de la saison sportive, ce qui élimine tout

effet du sexe sur les caractéristiques avant entraînement et tout influence du sexe sur les réponses à l'entraînement.

A signaler aussi que toutes les comparaisons entre les filles et les garçons avant et après 10 mois d'entraînements se sont avérées non significatives (tableau 9).

Tableau 9 : Différences des moyennes des variables entre filles (F) et garçons(G) au début et à la fin de la saison sportive et différences entre les moyennes au début et celles à la fin chez les filles d'une part et chez les garçons d'autre part dans leurs groupes respectifs. (S : sprinteurs, D : athlètes de demi-fond, SJ : squat jump, CMJ : contre mouvement jump IP : indice de Puissance du soléaire, Fmax : force maximale du soléaire, M : moyenne arithmétique, Diff.M : différence moyenne, SEM : erreur standard moyenne).

Variables	Début de saison		Fin de saison		Diff. Début saison/Fin saison			
	S Diff. M±SEM	D Diff. M±SEM	S Diff. M±SEM	D Diff. M±SEM	S		D	
	F/G	F/G	F/G	F/G	F/F	G/G	F/F	G/G
Hmax (mv)	0,32±0,69	1,97±0,69	0,26± 0,69	1,96± 0,69	1,18± 0,69	1,23± 0,69	0,38± 0,69	0,40± 0,69
Mmax (mv)	2,71±2,18	1,97±0,69	2,21± 2,18	4,24± 2,18	0,39± 2,18	0,10± 2,18	0,14± 2,18	0,41± 2,18
Hmax /Mmax (%)	1,80±3,06	1,88±3,06	3,14± 3,06	0,20± 3,06	9,88± 3,06	4,93± 3,06	2,34± 3,06	4,03± 3,06
IP=CMJ-SJ (cm)	0,34±0,98	0,31±0,98	0,95± 0,98	0,39± 0,98	0,95± 0,98	0,34± 0,98	0,70± 0,98	0,77± 0,98
CT (s)	0,03±0,02	0,05±0,02	0,02± 0,02	0,04± 0,02	0,01± 0,02	0,02± 0,02	0,01± 0,02	0,008± 0,20
Fmax (Kg)	34,14 ±2,82	24,14 ±2,82	34,00 ±2,82	23,42 ±2,82	2,14 ±2,82	2,00 ±2,82	1,00 ±2,82	0,28 ±2,82

2. DISCUSSION

Sur la base des résultats rapportés dans le tableau 6, l'entraînement continu des sprinteurs- contrairement à celui des coureurs demi-fond - fait diminuer l'onde H du soléaire (de 1,21±0,24mv, p <0,05), vraisemblablement en raison d'être continuellement mis sous des grandes charges d'entraînement en terme de puissance explosive pour augmenter leurs forces maximales de leurs jambes (Fmax s'améliore de 2,07±0,28Kg, p <0,05) et performer dans les mouvements très rapides (CT s'améliore de 0,02±0,0s, p <0,05). Ces résultats suggèrent

donc, que l'excitabilité des neurones moteurs spinaux type lent des sprinteurs peut être diminuée par l'entraînement pour laisser augmenter la force maximale instantanée (et la puissance contractile explosive).

De même, l'entraînement physique systématique de l'endurance ou l'explosivité peut induire une éventuelle transition en unités motrices ou proportion de fibres type lent ou type rapide, ce qui pourrait aussi expliquer les améliorations des performances des qualités neuromusculaires dans un sens ou dans l'autre, puisque les athlètes entraînés pour les sprints (anaérobie) produisent plus de force et de puissance grâce à un pourcentage élevé d'unités motrices rapides que leurs homologues entraînés pour le demi-fond (aérobie). Par ailleurs, le niveau de force inférieur évoqué par les unités motrices activées chez les athlètes entraînés pour l'endurance (tableau 7) est associé à une plus grande excitabilité du réflexe du pool moteur lent et par conséquent, ces athlètes formés à l'endurance produisent leurs forces nécessaires par le recrutement d'unités de contraction lente. Donc, l'entraînement spécifique en force/puissance/explosivité augmente la force de sortie de l'ensemble des unités motrices et réduit l'excitabilité des neurones moteurs spinaux type lent, ce qui peut engendrer des améliorations dans la pratique sportive des sprinteurs en courant et sautant plus rapide et plus explosif.

De toute façon, et même si les résultats de cette étude ne peuvent pas être explicitement interprétés que par l'inhibition réflexe du pool de motoneurones expliquant les dépressions du réflexe H, nous envisageons également (comme pour la première étude) la possibilité d'une adaptation des propriétés intracellulaires des α -motoneurones, bien qu'une telle adaptation intrinsèque de la fréquence de déclenchement du motoneurone α à un entraînement excitateur constant n'ait été observée que chez le chat (Kernell, 1982).

Ces résultats suggèrent donc, que l'excitabilité des neurones moteurs spinaux type lent des sprinteurs peut être diminuée par l'entraînement pour laisser augmenter la force maximale instantanée (et la puissance contractile explosive), puisqu'ils produisent plus de force et de puissance grâce à un pourcentage élevé d'unités motrices rapides que leurs homologues entraînés pour le demi-fond (aérobie). Par ailleurs, les résultats des corrélations entre les paramètres électromyographiques (Hmax et Hmax/Mmax) et les variables physiques (SJ, CMJ, IP, CT et Fmax) chez tous les athlètes pour toutes les mesures avant la saison sportive révèlent, d'une part que toutes les associations bilatérales sont significatives ($p < 0,01$) et

d'autre part que les performances en détente (SJ, CMJ), en explosivité (IP, CT) et en Fmax sont liées négativement aux valeurs de Hmax et Hmax/Mmax.

3. CONCLUSION

L'entraînement spécifique de 10 mois en force, en puissance et en explosivité, augmente la décharge nerveuse de l'ensemble des unités motrices et réduit l'excitabilité des neurones moteurs spinaux type lent (Ia), ce qui pourrait engendrer des améliorations dans la pratique sportive des sprinteurs en courant et en sautant plus rapide et plus explosif.

Cependant, le niveau de performance en force inférieur évoqué par les unités motrices activées chez les athlètes entraînés pour l'endurance est associé à une plus grande facilitation du réflexe du pool moteur lent et par conséquent, ces athlètes formés à l'endurance produisent leurs forces nécessaires par le recrutement d'unités de contraction lente.

V. DISCUSSION GENERALE

Il est important de noter que puisque le muscle soléaire est composé principalement de fibres lentes (80% - d'après Johnson et al 1973) et donc d'unités motrices lentes (Burke et coll. 1981) et que suite au diamètre large de ses afférences (Ia) et à celui plus petit de ses axones moteur alpha, il reste un muscle très adapté pour la mesure et l'étude du réflexe de Hoffmann (Schieppati 1987). De plus, il a été admis depuis plusieurs années que la réponse (H) est liée à l'activation des unités motrices lentes (Buchthal et Schmalbruch 1970, Nardone et Schieppati 1988, Calancie et Bawa 1990) et qu'il y a une relation entre l'amplitude de cette réponse et la proportion de fibres lentes du muscle soléaire (Almeida-Silveira et al 1996). De même, on a déjà constaté chez les athlètes entraînés en endurance une réponse H maximale plus grande et une proportion de fibres de type lent plus importante par rapport à des sujets sédentaires (Rochcongar et al 1979 ; Clarkson et al 1980). Toutefois, on a constaté chez des athlètes entraînés pour des efforts de type explosif des réponses H maximales plus faibles que celles des sujets sédentaires (Casabona et al 1990, Nielsen et coll. 1993) ainsi qu'une proportion de fibres de type rapide plus importante (Staron et al 1984). Dans cette étude, nos résultats soutiennent des déductions semblables. En effet, le ratio Hmax/Mmax s'est avéré chez les athlètes qui s'entraînent plus dans leurs spécialités à des efforts aérobies (nageur et coureurs de longues distances) plus élevé que chez ceux qui pratiquent les sports exigeant plus

d'exercices anaérobies et beaucoup de cycles de puissance et d'explosivité (sprinteurs). Ce qui indique une association entre l'endurance et la capacité de recruter une grande proportion de l'ensemble du parc moteur (α MN) en réponse à la volée afférente Ia.

Sachant qu'il est admis que (H max) est une mesure d'activation réflexe maximale, autrement dit une estimation du taux de motoneurones α recrutés grâce à l'activation de toutes les unités motrices à contraction lente voire intermédiaires (Buchthal et Schmalbruch, 1970), et que (M max) représente l'activation maximale de tous les motoneurones α (activation de toutes les unités motrices, y compris les unités à contraction rapide) (McComas et al., 1971), les résultats s'avèrent être d'importance puisqu'ils permettent de suggérer que la dépression Hmax/Mmax constatée pourrait être liée à la fois à une inhibition pré-synaptique des afférences (Ia) (Bongiovanni et Hagbarth 1990, Macefield et al., 1991) et probablement aussi à une diminution de l'excitabilité du pool motoneuronal α (Andersen et al., 2003, Bulbulian et Bowles 1992, Duchateau et al., 2002).

En fait, les changements enregistrés dans le réflexe H par les charges dues aux différents entraînements physiques trouvent logiquement leur interprétation-comme le suggère aussi la littérature (Berthe Hanna-Boutros, 2014), par cette modification au niveau du contrôle spinal entre les afférences Ia et les motoneurones α (α MN). C'est au niveau de cette connexion où pourrait être engendrés d'éventuelles modifications présynaptiques. En effet, l'inhibition présynaptique (figure 28) modifie la libération de neurotransmetteurs au niveau de la synapse Ia-(α MN) et peut se traduire par une diminution du réflexe H. Chez les humains, les changements dans l'inhibition présynaptique ont été déjà observés ailleurs avec la contraction volontaire (Romano C, 1987), les ajustements posturaux (Trimble MH., 1998) et la stimulation corticale (Trimble, 1998 ; Pyndt, 2003).

Une autre considération méthodologique à prendre en compte est la normalisation de l'amplitude du réflexe H par rapport à la réponse M maximale. Cette précaution permettra de s'affranchir d'éventuelles modifications sarcolémales et permettra également d'apprécier la proportion des motoneurones susceptibles d'être activée par voie monosynaptique. De toute façon, et même si les données de ce travail ne peuvent pas être explicitement interprétées que par l'inhibition réflexe du pool de motoneurones expliquant les dépressions du réflexe H, nous envisageons également la possibilité d'une adaptation des propriétés intrinsèques des α -motoneurones (Johnson et al. 2004), bien qu'une telle adaptation à un entraînement excitateur constant n'ait été observée que chez le chat (Kernell et Monster 1982).

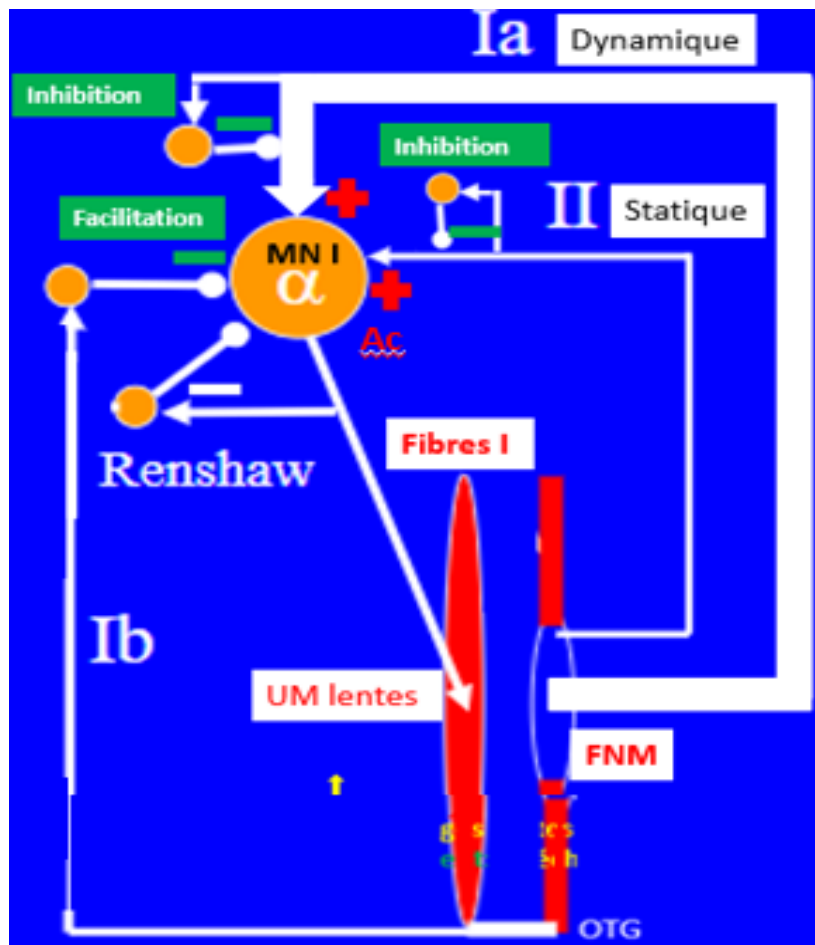


Figure 28 : Inhibitions présynaptiques Ia/II-(α MN)

Ainsi, le rapport H_{max}/M_{max} , peut sans aucun doute être considéré comme un indice du niveau d'excitabilité réflexe du pool motoneuronal (α MN) : sa valeur dépend du taux de facilitation de la transmission nerveuse entre les fibres (Ia) et les motoneurones alpha comme le suggéraient déjà les travaux de (Burke et coll. 1984 ; Schieppati 1987). D'autres études précédentes ont aussi montré que le type de charge physique pourrait affecter cette plasticité neuronale au niveau de la moelle épinière et ceci en association avec l'apprentissage moteur et les améliorations de la performance (Windhorst 1996 ; Wolpaw et Tennissen 2001).

De même, Casabona et al. (1990) et Maffiuletti et al., (2001) ont remarqué que les ondes H au niveau du soléaire sont plus petites chez les athlètes à entraînement explosif. Une autre étude plus récente a associé la dépression des réflexes H à une éventuelle inhibition présynaptique (Phadke et al. 2009). D'autres études ont aussi montré que le réflexe H du

soléaire a été signalé plus élevé chez les nageurs que chez les non-nageurs (Ogawa, 2009) et que l'onde H augmente avec l'entraînement dans un environnement sous l'eau (Nakazawa, 2004 ; Miyoshi, 2003). D'autres études encore ont aussi rapporté que l'amplitude des ondes H est plus grande chez les athlètes principalement engagés dans l'endurance que chez ceux principalement engagés dans la puissance (Vila-cha Carolina et coll, 2011), cette variation - comme en témoignent les résultats de cette étude - peut être associée à des différences dans le niveau de chargement des membres inférieurs en explosivité, force et puissance. A cet égard, l'entraînement continu en sprint fait diminuer l'amplitude H du soléaire, vraisemblablement en raison d'être continuellement mis sous de grandes charges d'entraînement en terme de force et de puissance explosive puisque les sprinteurs et les sauteurs ont besoin d'augmenter la force maximale de leurs jambes pour exécuter des mouvements très rapides. Les résultats de la présente étude suggèrent que l'excitabilité des neurones moteurs spinaux des sprinteurs peut être diminuée par l'entraînement pour augmenter la force maximale instantanée (et la puissance contractile explosive) au niveau du soléaire qui est un muscle lent. En outre, la réduction de l'excitabilité des neurones moteurs spinaux au niveau du soléaire (muscle lent) peut être associée à une capacité accrue à courir et sauter plus rapide et plus explosif.

Nous pensons aussi que l'entraînement physique systématique de la qualité physique endurance ou l'explosivité peut induire une éventuelle transition en unités motrices ou proportion de fibres type lent ou type rapide, ce qui pourrait aussi expliquer les améliorations des performances des qualités neuromusculaires, puisque les athlètes entraînés pour les sauts et sprint (anaérobie) produisent plus de forces au niveau du soléaire, avec un taux accru d'accumulation de tension et d'élasticité musculaires, que leurs homologues d'endurance. Par ailleurs, le niveau de force inférieur évoqué par les unités motrices activées chez les athlètes entraînés en endurance est associé à une plus grande excitabilité du réflexe du pool moteur lent et par conséquent, ces athlètes produisent leurs forces nécessaires par le recrutement d'unités de contraction lente au niveau du soléaire. Donc, l'entraînement en force/puissance/explosivité augmente la force de sortie de l'ensemble des unités motrices.

D'autre part, les étirements réalisés pendant l'échauffement, avant une séance d'entraînement induisent des modifications immédiates de la fonction musculo-tendineuse qui peuvent nuire à la performance sportive. Ceux-ci ont apparemment un effet inverse à celui supposé ou désiré.

En effet, face au tableau très négatif des effets immédiats des étirements sur le muscle soléaire (diminution de la capacité à générer une force importante correspondant à une réduction du nombre de ponts d'actine-myosine (Nelson et coll. 2005), les résultats de cette étude ont montré qu'il y avait augmentation de l'amplitude articulaire immédiatement après les étirements (SJ et CMJ). Les étirements auraient donc des effets bénéfiques à long terme sur les capacités de restitution de l'énergie élastique, et donc pour les exercices exigeants plus de souplesse.

Sur la base de tous ces résultats, il est possible donc, que les sollicitations physiques (explosivité, résistance, endurance, étirement...) peuvent influencer spécifiquement l'excitabilité des neurones moteurs spinaux, la raison pour laquelle les résultats de notre étude soutiennent le fait qu'on pourrait admettre que le type de sollicitation musculaire à court ou à long terme agit sur les paramètres réflexe H et réponse M puisqu'il permet d'engendrer des changements au niveau synaptique, myotypologique et neuromusculaire influençant sans aucun doute le niveau de force, de puissance, d'explosivité et d'endurance... Donc le rapport H_{max}/M_{max} pourrait être considéré comme un outil de suivi des entraînements et de détection des athlètes doués pour une meilleure adaptation à l'endurance, à la résistance ou à l'explosivité.

VI. CONCLUSION GENERALE

Le ratio (H_{max}/M_{max}) peut sans aucun doute être considéré comme un indicateur du niveau d'excitabilité réflexe du pool motoneuronal (αMN): sa valeur dépend du taux de facilitation des transmissions entre les fibres Ia et les motoneurons alpha comme l'ont suggéré aussi (Burke et al. 1999 et Schieppati 1987). Ce rapport pourrait sans aucun doute être utile dans le suivi de l'évolution des qualités physiques des entraînés dont la musculature répond rapidement par une meilleure adaptation à l'endurance, à la résistance ou à l'explosivité. Toutefois, Il faut être très prudent sur ce point, puisque rien n'empêche de penser qu'il n'y ait pas des caractéristiques de H_{max}/M_{max} pour chaque discipline sportive. Mais c'est le suivi de la rapidité de l'évolution de ce ratio grâce aux charges d'entraînement qui permettra de cibler le choix des qualités physiques à développer plus chez les différents sportifs afin d'améliorer leurs orientations.

C'est en ayant conscience des différents effets des sollicitations physiques que les spécialistes de la performance motrice pourront répondre parfaitement aux attentes des

sportifs et de leurs entraîneurs. Cette prise de conscience passe par la compréhension des phénomènes de réaction et d'adaptation du muscle et des différents types d'effets (immédiats et à long terme) sur le système neuro-musculo-tendineux.

Beaucoup de zones d'ombre concernant ces effets, notamment en ce qui concerne la compréhension des mécanismes qui entrent en jeu et qui permettraient d'expliquer pourquoi on observe une baisse ou une augmentation de performance en force/puissance/vitesse suite à une session d'étirements ou à un programme d'entraînement.

A l'heure actuelle, il n'existe pas assez de données scientifiques pour établir des corrélations entre la typologie musculaire et les différents types d'exercice musculaire. En fait, à ce jour, seule la distinction la plus élémentaire entre fibres lentes (type I) et rapides (type II) a pu être corrélée de manière satisfaisante avec les exercices d'endurance ou de résistance chez l'homme.

Des études supplémentaires sont donc nécessaires avant de proposer des lignes directrices pour l'entraînement et qui seraient issues d'un consensus général entre les physiologistes sur ce thème.

VII. PERSPECTIVES

L'onde F (figure 29) correspond à l'activation antidromique d'un pourcentage de motoneurons « rapides » du muscle considéré par stimulation supramaximale de troncs nerveux périphériques générant des influx nerveux qui gagnent la moelle en remontant le long des fibres motrices, puis redescendent par le trajet inverse jusqu'au muscle.

Ce sont Magladery et McDougal (1950) qui, les premiers, ont observé ces réponses tardives au niveau du pied chez l'homme, d'où leur appellation (F pour foot). Dawson et Merton (1956) ont ensuite démontré que celles-ci ne résultaient pas d'un réflexe, mais de la décharge des motoneurons suite à leur activation rétrograde par des volées d'influx centripètes.

Lors de la stimulation nerveuse supramaximale, plusieurs unités motrices (UM) « rapides » participent à la formation de la réponse F.

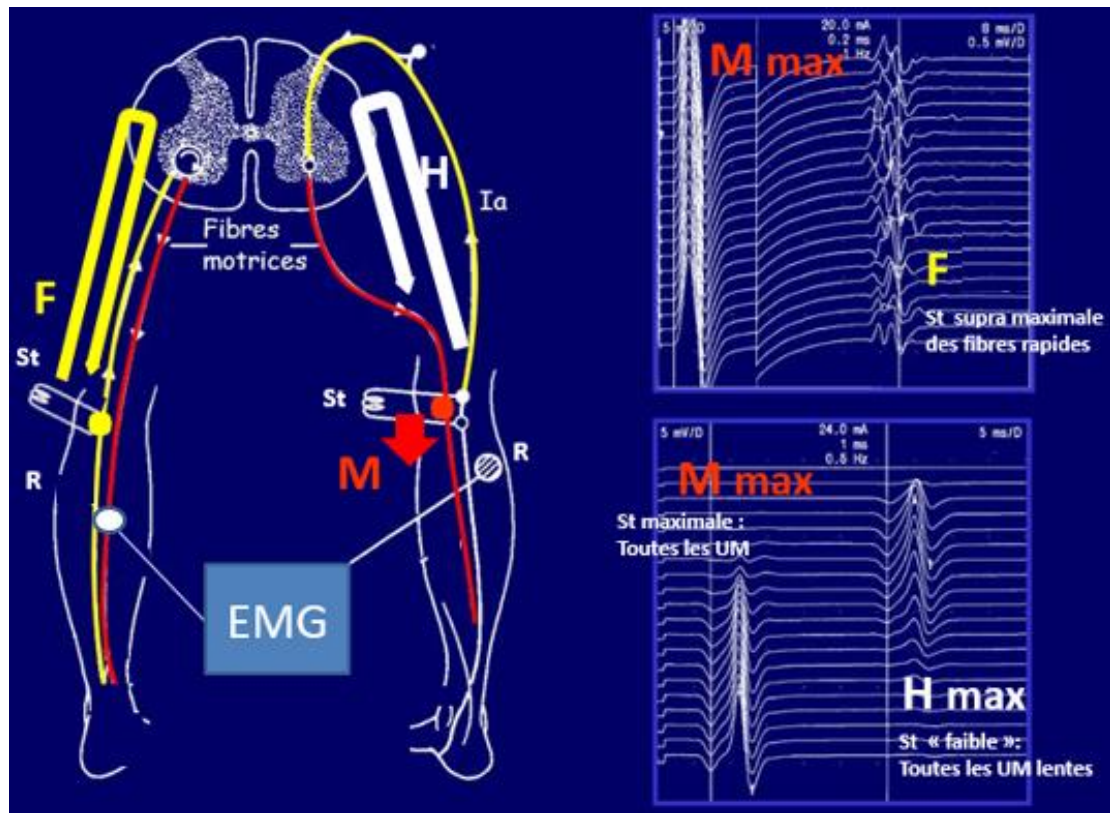


Figure 29: Réponses H, M et F du nerf tibial : stimulation au creux poplité ; recueil sur le soléaire

L'existence d'une évocation préférentielle des réponses F par la sous-population des UM à conduction axonale rapide constitue une hypothèse défendue par Fisher (1982, 1985, 1988, 1992) et Dengler et al. (1992) en se basant notamment sur le principe que les cellules de Renshaw seraient activées par les influx antidromiques véhiculés par les axones moteurs à conduction rapide et n'exerceraient leur activité inhibitrice que sur les motoneurones à conduction lente.

Lors de la stimulation nerveuse supramaximale, plusieurs unités motrices (UM) « rapides » participent à la formation de la réponse F.

L'existence d'une évocation préférentielle des réponses F par la sous-population des UM à conduction axonale rapide constitue une hypothèse défendue par Fisher (1982, 1985, 1988, 1992) et Dengler et al. (1992) en se basant notamment sur le principe que les cellules de Renshaw seraient activées par les influx antidromiques véhiculés par les axones moteurs à

conduction rapide et n'exerceraient leur activité inhibitrice que sur les motoneurones à conduction lente.

L'enregistrement d'une réponse F implique que le potentiels d'action (PA) antidromique se dirige vers l'arbre dendritique proximal provoquant un PA somatique propagé le long de l'axone, correspondant à la réponse F (Eccles, 1955). Dès lors, la genèse d'une réponse F est conditionnée par le niveau d'excitabilité du motoneurone ajusté en permanence par les afférences inhibitrices et activatrices

On pense donc, qu'il s'agit d'un moyen d'étudier le fonctionnement des jonctions neuromusculaires et de dépister les inhibitions et les facilitations de la transmission neuromusculaire. En pratique, entre deux moments (2 tests), un décrétement d'amplitude traduit une réduction du nombre de fibres musculaires « rapides » qui répondent à la stimulation nerveuse supra maximale. Il témoigne d'une altération de la transmission neuromusculaire : les jonctions « rapides » ne parviennent pas à suivre la cadence de stimulation, et à transmettre aux fibres musculaires « rapides » les activités nerveuses.

D'autre part, la mesure de la latence de ces réponses indirectes et tardives permet de calculer des vitesses de conduction proximales qui renseignent sur l'état de la conduction dans les segments nerveux (inhibitions/facilitations) : variable qu'on peut suivre son évolution avec la vitesse maximale du sportif, et peut être même à corrélérer avec d'autres indicateurs de la performance (Vo2max, volume musculaire, taille...).

En clinique, l'absence des ondes F est un signe évocateur de blocs de conduction proximaux. Mais la méthode n'a jamais été utilisé dans le but de vérifier l'existence d'éventuelles inhibitions ou facilitations.

Cette piste de recherche peut s'avérer intéressante pour continuer avec la même technique électromyographique à comprendre les adaptations neuromusculaires et myotypologiques dues à la charge physique surtout avec les jeunes profils athlétiques en contrôlant l'évolution de l'onde F. Et peut-être élargir cette étude avec les sportives filles et femmes et même avec les sportifs vétérans.

On peut aussi envisager d'étudier l'effet des saisons (jours longs vs jours courts) sur la variabilité des amplitudes H, M et F et de la performance.

Bibliographie

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P.. Neuraladaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol*, (2002), 92(6), 2309-2318.
- Abe T, Kumagai K, Brechue WF. Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1125-9
- Almeida-Silveira, MI., Pérot, C. &Goubel, F. Neuromuscular adaptations in rats trained by muscle stretch-shortening. *Europ. J. Appl. Physiol.* (1996) 72: 261.
- Andersen, J. L., & Aagaard, P. Myosin heavy chain IIX overshoot in human skeletal muscle. *Muscle Nerve*, 23(7), (2000) 1095-1104.
- Andersen B, Westlund B, Krarup C : Failure of activation of spinal motoneurons after muscle fatigue in healthy subjects studied by transcranial magnetic stimulation. *J Physiol* (2003) 551:345–356
- Avela J, Kyröläinen H, Komi PV. Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *J Appl Physiol*. 1999;86(4):1283-91.
- Babault, N., Pousson, M., Ballay, Y., & Van Hoecke, J. Activation of human quadricepsfemoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J Appl Physiol*, (2001). 91(6), 2628- 2634.
- Baldwin KM, Haddad F. Effects of different activity and inactivity paradigms on myosin heavy chain gene expression in striated muscle. *J Appl Physiol* 2001;90: 345-57.
- Bagust J. The effects of tenotomy upon the contraction characteristics of motor units in rabbit soleus muscle. *J Physiol* 1979, 290, 1-10.
- Beedle B, Rytter SJ, Healy RC, Ward TR. Pretesting Static and Dynamic Stretching Does Not Affect Maximal Strength. *J Strength.nov* 2008;22(6):1838-43.
- Behm DG, Blazevich AJ, Kay AD, McHugh M. Acute effects of muscle stretching on physical performance, range of motion, and injury incidence in healthy active individuals: a systematic review. *Appl Physiol Nutr Metab.* janv 2016;41(1):1-11.
- Bergeron R, Ren JM, Cadman KS, Moore IK, Perret P, et al. Chronic activation of AMP kinase results in NRF-1 activation and mitochondrial biogenesis. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001;281:E1340-6.
- Berthe Hanna-Boutros : Contrôle corticospinal sur les circuits neuronaux spinaux au cours de la locomotion chez l’homme. *Thèse. Université Pierre et Marie Curie* ; 2014.
- Bertrand BARON - Université de la Réunion, Patrick PELAYO - Université Lille 2. Physiologie de l'exercice - Vers une compréhension des limites de la performance motrice.14/12/2011. http://campusport.univ-lille2.fr/physio/co/module_integral_web.html

- Bianconi R., Granit R., Reis Dj. - The effects of extensor muscle spindles and tendon organs on homonymous motor neurons in relation to gamma-bias and curarization. *ActaPhysiol Scand*, 1964, 61, 331-347.
- Bishop D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Med Auckl NZ*. 2003;33(7):483-98.
- Bongiovanni LG, Hagbarth KE. Tonic vibration reflexes elicited during fatigue from maximal voluntary contractions in man. *J Physiol* 423:1–14,1990. Buchthal F & Schmalbruch H. Motor unit of mammalian muscle. *Physiol Rev* (1980) ; 60, 90-142.
- Bottinelli R, Betto R, Schiaffino S, Reggiani C. Maximum shortening velocity and coexistence of myosin heavy chain isoforms in single skinned fast fibres of rat skeletal muscle. *J Muscle Res Cell Motil* 1994;15:413-9.
- Buchthal F, Schmalbruch H. Contraction times of twitches evoked by H-reflex. *Acta Physiol Scand*.1990; 80:378–382.
- Bouisset, S., Maton, B. *Muscles, posture et mouvement. Bases et applications de la méthode électromyographique*, Editions Hermann, 1995 ; Paris.
- Bulbulian R, Bowles DK : Effect of downhill running on motoneuron pool excitability. *J ApplPhysiol* 1992 ;73:968–973
- Buller AJ, Eccles JC & Eccles RM. Interactions between motoneurons and muscles in respect of the characteristic speeds of their responses. *J Physiol* 1960 ;150, 417-439.
- Burke, D.,. The activity of human muscle spindle endings in normal motor behavior. *IntRev Physiol* 1981 ; 25, 91–126.
- Burke D, Gandevia SC. Properties of human peripheral nerves: implications for studies of human motor control. *Prog Brain Res*. 1999; 123: 427-435.
- Calancie B, Bawa P. Voluntary and reflexive recruitment of flexor carpi radialis motor units in humans.*J Neurophysiol*. 1985 May;53(5):1194-200.
- Capaday C. méthodes neurophysiologiques pour les études du système de moteur à se déplacer librement des sujets humains. *J Neurosci Methods*. 1997; 74 : 201-218.
- Casabona A, Polizzi MC, Perciavalle V. Differences in H-reflex between athletes trained for explosive contractions and non-trained subjects. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1990; 61: 26-32.
- Clarkson, P. M., Kroll, W. & McBride, T. C. Maximal isometric strength and fiber type composition in power and endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology* 1980 ; 44, 35-42.
- Costill, D. L., Coyle, E. F., Fink, W. F., Lesmes, G. R., & Witzmann, F. A. .Adaptations in skeletal muscle following strength training. *J Appl Physiol*, 1979 ; 46(1), 96-99.
- Csapo R, Maganaris CN, Seynnes OR, Narici MV. On muscle, tendon and high heels. *J Exp Biol*. 2010 : 1;213(Pt 15):2582-8
- Dawson GD, Merton PA. Recurrent discharges from motoneurons. *Proceedings of the 2nd Intern Congress of Physiol Science* 1956 ;65 :221–2.

- Delp MD, Pette D. Morphological changes during fiber type transitions in low-frequency-stimulated rat fast-twitch muscle. *Cell Tissue Res* 1994;277:363-71.
- Delwaide Pj. - Human monosynaptic reflexes and presynaptic inhibition. An interpretation of spastic hyperreflexia. In : Desmedt JE (Ed) : *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*. Karger, Base1, vol 3, pp 508-522, 1973.
- Dengler R, Kossev A, Wohlfahrt K, Schubert M, Elek J, Wolf W. F waves and motor unit size. *Muscle Nerve* 1992 ;15 :1138-42.
- Didier, J.-P., *La plasticité de la fonction motrice*. 2009.Springer.
- Duchateau J, Baudry S. Insights into the neural control of eccentric contractions. *J Appl Physiol*. 2014;116(11):1418-25.
- Eccles, J.C., Eccles, R.M., Lundberg, A., Synaptic actions on motoneurons caused by impulses in Golgi tendon organ afferents. *J Physiol* 1957 ; 138, 227-252.
- Eccles JC, Schmidt RF, Willis WD. Presynaptic inhibition of the spinal monosynaptic reflex pathway. *J Physiol* 1962;161:282-97.
- Eccles JC. The central action of antidromic impulses in motor nerve fibers. *Pflugers Arch* 1955 ;260 :385-415.
- Edström L. Selective changes in the sizes of red and white muscle fibres in upper motor lesions and Parkinsonism. *J Neurol Sci* 1970;11:537-50.
- Enoka, R. M. Neural adaptations with chronic physical activity. *J Biomech*, 1997 ; 30(5), 447-455.
- Enoka, R. M. *Neuromechanics of Human Movement* (3rd ed.). Champaign: Human Kinetics. 2002
- Evetovich, T. K., Housh, T. J., Housh, D. J., Johnson, G. O., Smith, D. B., & Ebersole, K. T. The effect of concentric isokinetic strength training of the quadriceps femoris on electromyography and muscle strength in the trained and untrained limb. *J Strength Cond Res*, 2001 ; 15(4), 439-445.
- Fischbach GD & Robbins N. Changes in contractile properties of disused soleus muscles. *J Physiol* 1969 ; 201, 305-320.
- Fisher MA. F response latency determination. *Muscle Nerve* 1982 ;5 :730-4.
- Fisher MA. F waves. *Muscle Nerve* 1985 ;8 :71-2.
- Fisher MA. Evidence for selective activation of faster conducting motor fibers in F waves. *Muscle Nerve* 1988 ;11 :983.
- Fisher MA. AAEM minimonograph 13 : H reflexes and F waves: physiology and clinical indications. *Muscle Nerve* 1992 ;15 :1223-33.
- Fluck M, Hoppeler H. Molecular basis of skeletal muscle plasticity - from gene to form and function. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 2003;146:159-216.
- Frank K, Fuortes MGF. Presynaptic and postsynaptic inhibition of monosynaptic reflexes. *Fed Proc* 1957;16:39-40.

- Freyssenet D, Di Carlo M, Hood DA. Calcium-dependent regulation of cytochrome c gene expression in skeletal muscle cells. Identification of a protein kinase c-dependent pathway. *J Biol Chem* 1999;274: 9305-11.
- Geoffroy C. Méthodes et positions d'étirements : logique, précision et individualisation pour plus d'efficacité. *Kinésithérapie Rev.* août 2015;15(164-165):41-52.
- Goldspink DF1, Cox VM, Smith SK, Eaves LA, Osbaldeston NJ, Lee DM, Mantle D. Muscle growth in response to mechanical stimuli. *J Physiol.* 1995 Feb;268(2 Pt 1):E288-97.
- Goulart F, Valls-Solé J, Alvarez R. Posture-related changes of soleus H-reflex excitability. *MuscleNerve.* 2000 ; 23 : 925–932.
- Guissard N, Duchateau J. Effect of static stretch training on neural and mechanical properties of the human plantar-flexor muscles. *Muscle Nerve.* 2004; 29(2):248-55
- Guissard N, Duchateau J, Hainaut K. Mechanisms of decreased motoneurone excitation during passive muscle stretching. *Exp Brain Res.* 19 mars 2001;137(2):163-9.
- Gundersen K. Excitation-transcription coupling in skeletal muscle: the molecular pathways of exercise. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society.* 2010.
- Heckman, C.J., Kuo, J.J., Johnson, M.D., Synaptic integration in motoneurons with hyperexcitable dendrites. *Can J Physiol Pharmacol* 2004. 82, 549–555.
- Herda TJ, Ryan ED, Costa PB et al. Acute effects of passive stretching and vibration on the electromechanical delay and musculotendinous stiffness of the plantar flexors. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 2010; 50(6):277-88
- Higbie, E. J., Cureton, K. J., Warren, G. L., 3rd, & Prior, B. M. Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area, and neural activation. *J Appl Physiol*, 1996 ; 81(5), 2173-2181.
- Hood DA. Invited Review : Contractile activity-induced mitochondrial biogenesis in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 2001;90:1137-57.
- Hortobagyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J & Dohm L. Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol* 2000 ; 524 Pt 1, 293- 304.
- Houk JC, Crago Pe, Rymer Wz. - Functional properties of the Golgi tendon organs. In : JE Desmedt (Ed) : *Prog Clin Neurophysiol.*, Karger, Basel, 1980 ; vol 8, pp 33-43,
- Hutton Rs, Smith JI, Eldred E. – Postcontraction sensory discharge from muscle and its source. *J Neurophysiol*, 1973, 36, 1090-1103
- J.C.Chatard,. *Energétique de l'exercice musculaire*, Lab. Phys, Fac. Médecine St-Etienne, 1991
- J.Massion, *Fonctions motrices.* *Encycl Med Chir (Elsevier, Paris)*, 26.012.A.10. 1998
- Jaschinski F, Schuler M, Peuker H, Pette D. Changes in myosin heavy chain mRNA and protein isoforms of rat muscle during forced contractile activity. *Am J Physiol* 1998;274:C365-70.

- Johnson KVB, Edwards SC, Van Tongeren C, Bawa P. Properties of human motor units after prolonged activity at a constant firing rate. *Exp Brain Res* 154: 479 – 487, 2004.
- Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci.* 1973 Jan;18(1):111-29.
- Kamen, G., & Knight, C. A. Training-related adaptations in motor unit discharge rate in young and older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2004 ; 59(12), 1334-1338.
- Kay AD, Blazevich AJ. Effect of Acute Static Stretch on Maximal Muscle Performance: A Systematic Review. *Med Sci Sports Exerc.* Janv 2012;44(1):154-64.
- Kernell D, Monster AW. Motoneurone properties and motor fatigue. An intracellular study of gastrocnemius motoneurons of the cat. *Exp Brain Res.* 1982; 46(2):197–204.
- LaRoche DP, Connolly DA. Effects of stretching on passive muscle tension and response to eccentric exercise. *Am J Sports Med.* 2006; 34(6):1000-7
- Lechaue JB, Parrault H, Aguilaniu B, et al. Breathing patterns during eccentric exercise. *Respir Physiol Neurobiol.* 2014;202:53–8.
- Leeuw T, Pette D. Coordinate changes of myosin light and heavy chain isoforms during forced fiber type transitions in rabbit muscle. *Dev Genet* 1996;19:163-8.
- Liu, Y., Schlumberger, A., Wirth, K., Schmidtbleicher, D., & Steinacker, J. M.. Different effects on human skeletal myosin heavy chain isoform expression: strength vs. combination training. *J Appl Physiol*, 2003 ; 94(6), 2282-2288.
- Macefield G, Hagbarth, KE, Gorman R, Gandevia SC, Burke D. Decline in spindle support to a-motoneurons during sustained voluntary contractions. *Journal of Physiology* 1991; 440: 497-512.
- Magladery JW, McDougal DB. Electrophysiological studies of nerve and reflex activity in normal man. I. Identification of certain reflexes in the electromyogram and the conduction velocity of peripheral nerve fibres. *Bull Johns Hopkins Hosp* 1950 ;86 :265–90.
- Maria conceta Vinti. Caractérisation biomécanique et physiologique de la cocontraction spastique dans la parésie spastique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2012. Français. .
- Marie-Agnès Giroux-Metges, Adaptations de la commande nerveuse du muscle en fonction des conditions dynamiques de sa contraction. Thèse, Univ de Bretagne occidentale, Fac de médecine, Laboratoire de Physiologie ; 2003.
- Maffiuletti NA, Martin A, Babault N, Pensini M, Lucas B, Schieppati M. Electrical and mechanical H(max)-to-M(max) ratio in power- and endurance-trained athletes. *J Appl Physiol.* 2001; 90: 3-9.
- McComas AJ, Fawcett PR, Campbell MJ, et al. — Electrophysiological estimation of the number of motor units within a human muscle. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 1971, 34, 121-131.
- McNair PJ, Dombroski EW, Hewson DJ, Stanley SN, others. Stretching at the ankle joint: viscoelastic responses to holds and continuous passive motion. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(3):354-8.

- Miyoshi T, D Nozaki, Sekiguchi H, et al. : Graviception somato-sensoriel. *ExpBrainRes* , 2003, 150 : 109-113.
- Monoem Haddad : Impact de l'entrainement pliométrique lors des divers créneaux intermittents courts-courts sur l'explosivité chez les jeunes Taekwondoïstes. ISSEP Ksar Saïd Tunis - Maîtrise d'éducation Physique 2008
- Montgomery He, Marshall R, Hemingway H, Myerson S, Clarkson P, et coll. Human Gene for physical performance. *Nature* 1998, 393 : 221-222
- Morgan DL, Allen DG. Early events in stretch-induced muscle damage. *J Appl Physiol*, 87: 2007–2015, 1999.
- Nakamura M, Ikezoe T, Takeno Y, Ichihashi N. Effects of a 4-week static stretch training program on passive stiffness of human gastrocnemius muscle-tendon unit in vivo. *Eur J Appl Physiol*. 2011 ; 2250-3
- Nakazawa K, T Miyoshi, H Sekiguchi et al. : Effets du chargement et déchargement des articulations des membres inférieurs sur le soléaire H-reflex chez l'homme debout. *Clin Neurophysiol* , 2004, 115 : 1296-1304.
- N. Holzer J.-L. Ziltener J. Menetrey : Plasticité du muscle strié squelettique : effet de l'entraînement et perspectives. *Rev Med Suisse* 2006; volume 2.31608
- Nardone A, Schieppati M. Postural adjustments associated with voluntary contraction of leg muscles in standing man. *J Experimental Brain Research (Exp Brain Res)* 69(3):469-80 · February 1988
- Nelson AG, Kokkonen J, Arnall DA. Acute muscle stretching inhibits muscle strength endurance performance. *J Strength Cond Res Natl Strength Cond Assoc*. mai 2005;19(2):338-43.
- Nicks DK, Beneke WM, Key RM & Timson BF. (1989). Muscle fibre size and number following immobilisation atrophy. *J Anat* 163, 1-5.
- Nielsen J, Kagamihara Y. The regulation of presynaptic inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *J Physiol*. 1993; 464: 575–593.
- Ogawa T, Kim GH, Sekiguchi H, et al. : Amélioration de l'excitabilité étirement réflexe du muscle soléaire chez les nageurs expérimentés. *Eur J ApplPhysiol* 2009, 105 : 199-205.
- Palomero J, Pye D, Kabayo T, Jackson MJ. Effect of passive stretch on intracellular nitric oxide and superoxide activities in single skeletal muscle fibres: influence of ageing. *Free Radic Res*. janv 2012;46(1):30-40.
- Paradisis GP, Pappas PT, Theodorou AS, Zacharogiannis EG, Skordilis EK, Smirniotou AS. Effects of static and dynamic stretching on sprint and jump performance in boys and girls. *J Strength Cond Res Natl Strength Cond Assoc*. janv 2014;28(1):154-60.
- Patten, C., Kamen, G., & Rowland, D. M. Adaptations in maximal motor unit discharge rate to strength training in young and older adults. *Muscle Nerve*, 2001 ; 24(4), 542-550.
- Pette D, Staron RS. Mammalian skeletal muscle fiber type transitions. *Int Rev Cytol* 1997;170:143-223

- Pette D, Vrbova G. Neural control of phenotypic expression in mammalian muscle fibers. *Muscle Nerve* 1985;8:676-89
- Phadke CP, Flynn SM, Thompson FJ, Behrman AL, Trimble MH, Kukulka CG. Comparaison des effets de seul épisode de formation de la bicyclette contre la formation locomotrice sur la dépression réflexe associé du soléaire réflexe H après moteur incomplète lésion de la moelle épinière. *Cambre. Phys. Med. Rehabil.* 2009; 90 : 1218-1228.
- Pierrot-Deseilligny E, Morin C, Bergeco C, Tankou N. - Pattern of groupe 1 fibre projections from ankle flexor and extensor muscles in man. *Exp Brain Res*, 1981, 42,337-350.
- Pensini, M., Martin, A., & Maffiuletti, N. A. Central versus peripheral adaptations following eccentric resistance training. *Int J Sports Med*, 2002 ; 23(8), 567-574.
- Pyndt HS, Nielsen JB. Modulation de la transmission dans les voies Ia afférences cortico et de groupe à motoneurons soléaires pendant le vélo. *J Neurophysiol.* 2003 ; 89 : 304-314.
- Quiat D, Voelker KA, Pei J, Grishin NV, Grange RW, Bassel-Duby R, Olson EN. Concerted regulation of myofiber-specific gene expression and muscle performance by the transcriptional repressor Sox6. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2011;108:10196-201.
- R.Thomas. J.Eclache, Les aptitudes motrices, structure et évaluation, Editions Vigot, 1989
- Richardson RS, Newcomer SC, Noyszewski EA. Skeletal muscle intracellular PO(2) assessed by myoglobin desaturation : Response to graded exercise. *J Appl Physiol* 2001;91:2679-85
- Rochcongar, P., Dassonville, J. and Le Bars, R. (1979). Modifications du réflexe de Hoffmann en fonction de l'entraînement chez le sportif. *Eur. J. Appl. Physiol.* 40, 165-170
- Romano C, Schieppati M. Reflex excitabilité des motoneurons soléaires humaines pendant le raccourcissement volontaire ou contractions allongement. *J Physiol.* 1987; 390 : 271-284.
- Schiaffino S, Gorza L, Sartore S, Saggin L, Ausoni S, et al. Three myosin heavy chain isoforms in type 2 skeletal muscle fibres. *J Muscle Res Cell Motil* 1989;10:197-205.
- Schieppati M. Le Hoffmann réflexe : un moyen d'évaluer la colonne vertébrale excitabilité réflexe et son contrôle descendant dans l'homme. *Prog Neurobiol.* 1987; 28 : 345-376.
- Scott W, Stevens J, Binder-Macleod SA. Human skeletal muscle fiber type classifications. *Phys Ther* 2001; 81:1810-6.
- Shi H, Scheffler JM, Pleitner JM, Zeng C, Park S, Hannon KM, et al. Modulation of skeletal muscle fiber type by mitogen-activated protein kinase signaling. *Faseb J.* 2008;22:2990-3000.
- Shindo M, Hrayama H, Kondo K, Yanagisawa N, Tanaka R. - Changes in reciprocal la inhibition during voluntary contraction in man. *Exp Brain Res*, 1984, 53, 400-408 ..

- Smerdu V, Karsch-Mizrachi I, Campione M, Leinwand L, Schiaffino S. Type IIx myosin heavy chain transcripts are expressed in type IIb fibers of human skeletal muscle. *Am J Physiol* 1994;267:C1723-8.
- Staron R, Hikida RS, Hagerman FC, Dudley GA, Murray TF: HWI muscle skeletal muscle fiber type adaptability to various workloads. *J.HistochemCytochem* 32:146-152. 1984
- Talbot P. *Physiologie et pathologie du sport*, 1991. CHU Rennes,
- Tanaka R. Inhibitory mechanism in reciprocal innervation in voluntary movements. In : JE Desmedt (Ed) : *prog Clin Neurophysiol*. Karger, Basel, 1980 ; vol 8, pp 117-128,
- Trimble MH. Modulation posturale du réflexe segmentaire: effet de l' inclinaison du corps et le balancement postural. *Int J Neurosci*. 1998; 95 (1-2): 85-100.
- Van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. Changes in single motor unit behavior contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol*, 1998 ; 513 (Pt 1), 295-305.
- Vila-Cha, C., Falla, D., Correia, M. V., and Farina, D. Changes in H reflex and V wave following short-term endurance and strength training. *J. Appl. Physiol.*. doi: 2012 ; 10.1152/jappphysiol.00802.2011
- W. McArdle. *Physiologie de l'activité physique* 2001 ; Ed. Maloine
- Wall PD. Excitability changes in afferent fibre terminations and their relation to slow potentials. *J Physiol* 1958;142:i3-21.
- Windhorst U. La moelle épinière et ses cerveau: représentations et modèles. Dans quelle mesure les mécanismes du cerveau antérieur apparaissent au niveau de la moelle épinière du tronc cérébral? Programme. *Neurobiol*. 1996; 49 : 381-414.
- Wolpaw JR, Tennissen AM. Moelle épinière plasticité dépendant de l' activité dans la santé et la maladie. *Annu. Rev. Neurosci*. 2001; 24 : 807-843.
- Yang N, McArthur Dg, Gulbin Jp. Actn3 genotype is associated with human elite athlete performance. *Am J Hum Genet* 2003, 73 : 627-631
- Young JL, Mayer RF. Physiological alterations of motor units in hemiplegia. *J Neurol Sci* 1982;54:401-12.
- Zehr EP. Considérations pour l'utilisation du Hoffmann réflexe dans les études d'exercice. *Eur J Appl Physiol*. 2002; 86 : 455-468
- Zierath JR, Hawley JA. Skeletal muscle fiber type : Influence on contractile and metabolic properties. *PLoS Biol* 2004;2:e348.

Annexes

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SUIVANTES.

Publications et Communications

- Publication de l'Article intitulé: EFFETS DU TYPE D'ENTRAINEMENT SPORTIF SUR LE NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES dans le Journal : Science et Sports sous la référence: SCISPO3236 (Online publication complete: 20-SEP-2018)
- Le second travail traitant EFFETS DU TYPE D'ETIREMENT SUR LE NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES est soumis pour publication dans le même journal.
- La première étude a fait sujette d'une communication orale dans le cadre du 10ème congrès SFMES-SFTS qui s'est tenu à Marseille du 21 au 23 Septembre 2017.
- La seconde étude a fait sujette d'une communication orale dans le cadre du 3ème congrès International 2A2S qui s'est tenu à Rabat du 28 au 29 Mars 2018.
- Acceptation d'une troisième communication orale dans le cadre du 11ème congrès commun SFMES SFTS qui a eu lieu du 20 au 22 Septembre 2018 au Carré des Docks du Havre.



La société EVENTIME certifie par la présente que **Mustapha Ben Cheikh** a été retenu pour présenter l'(les) abstract(s) suivant(s) sous forme de Communication orale lors du congrès 10^{ème} congrès commun SFMES SFTS, à Marseille du 21 au 23 septembre 2017:

- Effets du type d'entraînement sportif sur le niveau d'excitabilité des motoneurones

Fait à Marseille le 12 juillet 2017,

EVENTIME SAS
44 Bd Périer
13008 Marseille - France
T : +33 4 91 94 54 72
Siret : 75079516400033
TVA intracom : FR43750495166

2A2S



L'ASSOCIATION AFRICAINE
DES SCIENCES DU SPORT

3^{ème} Congrès International de l'Association Africaine des Sciences du Sport (2A2S)

<http://www.2a2s.fr/?lang=en>

http://www.2a2s.fr/?page_id=813&lang=en

Monsieur Ben cheikh Mustapha,

Le comité scientifique du 3^e Congrès International de l'Association Africaine des Sciences du Sport, 2A2S, s'est réuni et a examiné la proposition de communication que vous avez soumise.

Nous avons le plaisir de vous annoncer que votre proposition intitulée :

« EFFETS DU TYPE D'ENTRAINEMENT ET D'ETIREMENT SUR LE NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES »

a été retenue pour une communication orale.

Nous vous invitons dès maintenant à vous inscrire sur le site internet ci-dessus pour profiter du tarif normal encore en cours.

En nous réjouissant de vous retrouver en Mars prochain, nous vous adressons, nos salutations les meilleures.

Cordialement,

P/Le comité d'Organisation

DR. ABDERRAOUF BEN ABDERRAHMAN

Vice Président du Congrès 2a2s Rabat-MAROC



28 & 29 mars 2018, Rabat - Maroc



Congrès national
de médecine et
traumatologie du sport

11^e Congrès SFMES SFTS

20, 21, 22
septembre
2018



www.congres-sfmes-sfts.com

LE HAVRE
CARRÉ DES DOCKS
QUAI DE LA RÉUNION

Congrès SFMES SFTS 2018 - Acceptation de votre abstract

Bonjour Mustapha BEN CHEIKH,

Nous avons le plaisir de vous annoncer que votre abstract n°13229

portant le titre **Effet du type d'étirement sur le niveau d'excitabilité des motoneurones**

a été accepté en tant que **communication orale** dans le cadre du 11^e Congrès SFMES-SFTS qui se tiendra du 20 au 22 septembre 2018 au Havre.

Votre présentation est prévue le **21/09/2018**

dans la session **Physiologie exercice**

Article soumis (Mai 2019) :

**EFFETS DU TYPE D'ETIREMENT SUR LE NIVEAU D'EXCITABILITE DES MOTONEURONES
EFFECTS OF THE TYPE OF STRETCHING ON THE LEVEL OF EXCITABILITY OF MOTONEURONES**

Ben cheikh M.; Chatoui H. ;Najimi M¹.; Bahi L¹

¹Laboratoire de Génie Biologique, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc.

Résumé :

Objectifs: Examiner les effets des étirements (statiques passifs, statiques actifs et activo-dynamiques) sur la plasticité neuronale spinale par le biais du réflexe de Hoffmann (H) et l'onde motrice M. Cette étude se propose de discuter l'hypothèse selon laquelle ces réponses réflexes pourront être utilisées pour estimer l'excitabilité des motoneurones et la transmission synaptique spinale lors de l'effort.

Méthodes: 2 groupes de 14 sportifs chacun (sprinteurs, athlètes demi-fond) ont accepté au début de la saison sportive d'effectuer avant puis juste après chaque type d'étirements des mesures au niveau du soléaire des réflexes H et M par électromyographie, de la puissance et l'explosivité en saut sur tapis de Bosco et de la force maximale par haltères.

Résultats: La comparaison des moyennes par anova a montré que :

- les différences entre les 2 groupes pour Hmax et Hmax/Mmax sont toutes statistiquement significatives ($p < 0,05$) : avec des valeurs plus faibles chez les sprinteurs/sauteurs que chez les athlètes du demi fond/fond.
- les différences entre les étirements dans chaque groupe puis intergroupes sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) pour toutes les variables sauf pour Mmax et SJ.
- les trois types d'étirements réduisent Hmax et Hmax/Mmax .
- les trois types d'étirements diminuent les performances physiques chez les athlètes.

Conclusion: Ces résultats suggèrent l'existence d'une adaptation synaptique au niveau spinal permettant d'expliquer le sens de l'évolution du réflexe H induit par le type d'étirement physique pratiqué (passif vs actif).

Mots clés : Réflexe de Hoffmann, Motoneurone, Myotypologie, Etirement

Summary:

Objectives: To examine the effects of stretching (passive static, active static and active-dynamic) on spinal neuronal plasticity by means of the Hoffmann reflex (H) and the driving wave M. This study proposes to discuss the hypothesis according to which these reflex responses can be used to estimate the excitability of motoneurons and spinal synaptic transmission during exercise.

Methods: 2 groups of 14 athletes each (sprinters, middle-distance athletes) accepted at the beginning of the sports season to carry out before and after each type of stretching measurements at the level of the soleus of reflexes H and M by electromyography, power and explosiveness in Bosco's carpet jump and maximum dumbbell force.

Results: The comparison of averages by anova showed that:

- the differences between the 2 groups for Hmax and Hmax / Mmax are all statistically significant ($p < 0.05$): with lower values for sprinters / jumpers than for half-bottom / bottom athletes.
- the differences between stretching in each group then intergroups are statistically significant ($p < 0.05$) for all variables except for Mmax and SJ.
- the three types of stretching reduce Hmax and Hmax / Mmax.
- the three types of stretching reduce physical performance in athletes.

Conclusion: These results suggest the existence of synaptic adaptation at the spinal level to explain the direction of the H-reflex evolution induced by the type of physical stretching (passive vs active).

Keywords: Hoffmann reflex, motor neuron, myotypology, stretching

ARTICLE ORIGINAL PUBLIEE (Journal Science et Sports, Juin 2018):

Effet du type d'entraînement sportif sur le niveau d'excitabilité des
motoneurones