



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



ARTICLE ORIGINAL

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

Sports training types effects on motoneurons excitability level

M. Ben cheikh^a, M. Najimi^a, X. Bigard^b, L. Bahi^{a,*}

^a Laboratoire de génie biologique, faculté des sciences et techniques, BP 523, 23000 Béni Mellal, Maroc

^b Agence française de lutte contre le dopage, 75013 Paris, France

Reçu le 21 février 2018 ; accepté le 3 juin 2018

Disponible sur Internet le 20 septembre 2018

MOTS CLÉS

Réflexe de Hoffmann ;
Motoneurone ;
Myotypologie ;
Entraînement

Résumé

Objectifs. — Examiner les effets de l'entraînement aérobie ou anaérobie 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.

Méthodes. — Quatre groupes de 14 sportifs chacun (sprinteurs, athlètes demi-fond, footballeurs et nageurs) ont accepté au début de la saison sportive de mesurer au niveau du soléaire la puissance et l'explosivité en saut sur tapis de Bosco, la force maximale par haltères et les réflexes H et M par électromyographie. Après 10 mois d'entraînement, les mêmes variables n'ont été mesurées que chez les deux groupes d'athlètes (sprinteurs, athlètes de demi-fond).

Résultats. — La comparaison des moyennes par Anova a montré que les différences intergroupes sont toutes statistiquement significatives ($p < 0,05$) pour l'amplitude maximale du réflexe H. Les moyennes de cette variable ont diminué significativement ($p < 0,05$) chez les sprinteurs et augmenté significativement ($p < 0,05$) chez les athlètes de demi-fond. De plus, les corrélations bilatérales entre les paramètres physiques et électromyographiques se sont révélées toutes significatives ($p < 0,01$) sauf pour Mmax. Toutefois, les comparaisons filles/garçons n'ont révélé aucune différence significative.

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'activité physique pratiquée (aérobie ou anaérobie).

© 2018 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : lahoucine.bahi@yahoo.fr (L. Bahi).

KEYWORDS

Hoffmann reflex;
Motoneurone;
Myotypology;
Training

Summary

Aims. – To examine the effects of aerobic or anaerobic training on spinal neuronal plasticity using the Hoffmann reflex (H) and the M motor wave. This study proposes to discuss the hypothesis that these reflex responses can be used to estimate motor neuron excitability and spinal synaptic transmission.

Methods. – Four groups of 14 athletes each (sprinters, middle-distance athletes, footballers and swimmers) have accepted at the beginning of the sporting season to measure the power and explosiveness of Bosco's carpet jump at the level of the soleus. by dumbbells and H and M reflexes by electromyography. After 10 months of training, the same variables were measured in both groups of athletes.

Results. – The comparison of Anova averages showed that the intergroup differences were all statistically significant ($P < 0.05$) for the maximum amplitude of the H reflex and that the means of this variable decreased significantly ($P < 0.05$) in the sprinters and increased significantly ($P < 0.05$) in middle-distance athletes. In addition, the bilateral correlations between physical and electromyographic parameters were all significant ($P < 0.01$) except for Mmax. However, comparisons between girls and boys did not reveal any significant results.

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 activity practiced (aerobic or anaerobic).

© 2018 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

Le réflexe de Hoffmann (réflexe H) a été décrit à l'origine par Paul Hoffmann en 1910 [1]. Ensuite, le test du réflexe H a été largement utilisé dans les années 1940 et au début des années 1950 en tant que mesure neurophysiologique pour examiner l'influence des afférences la sur les motoneurones alpha. Entre la fin des années 1950 et le milieu des années 1980, ce test a été modifié par une méthode de conditionnement de la stimulation électrique pour étudier les influences inhibitrices ou excitatrices des voies d'activation des motoneurones alpha [2]. Plus récemment, ce test a vu son utilisation dans les études sur le rôle de la boucle spinale dans divers aspects du mouvement humain, tels que le contrôle postural, les mouvements articulaires et la locomotion. Dans le cadre de la pratique sportive, ce test 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 Hmax/Mmax 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 Hmax/Mmax a été plus élevé chez les sportifs d'endurance et plus bas chez les sportifs de vitesse et de force [3].

Un certain nombre d'études ont aussi 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 [3,4] et inférieure chez ceux-ci que chez les personnes sédentaires [5].

Pour ce qui est de l'effet du type d'entraînement sur l'amplitude du réflexe H, Aagaard et al. [6] 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-Chã et al. [7] 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'autre part, des mesures ont été réalisées dans quelques études d'entraînement en force ou en endurance et n'ont rapporté pas de changements du réflexe H [8], 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 [8].

Prises ensemble, ces observations suggèrent que les circuits réflexes spinaux s'adaptent spécifiquement aux demandes d'entraînement. Cependant, les résultats de ces études doivent être interprétés avec prudence, car il n'est pas possible de dissocier complètement la part de la prédisposition génétique dans les adaptations réelles induites par l'entraînement [9].

Sachant que le réflexe de Hoffmann est considéré comme une estimation de l'excitabilité des motoneurones alpha (α MN) et de l'inhibition présynaptique [10], 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 chez quatre différents types de sportifs. Ainsi, déterminer si le type d'entraînement (aérobie versus anaérobie) affecte les réponses H et M et permet des modifications myotypologiques et des adaptations neuronales et musculaires spécifiques.

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.

2. Méthodes

2.1. Sujets

Quatre 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 qui a été menée conformément à la déclaration d'Helsinki. Le comité d'éthique local a donné son accord pour la réalisation de cette étude.

2.2. Protocole de l'étude

2.2.1. Électromyographie et mesure du réflexe de Hoffmann (H) et de l'onde motrice (M)

Les premières mesures, effectuées durant septembre, ont concerné tous les sportifs et les secondes effectuées en mois de juin (après 10 mois d'entraînement en dehors d'un conditionnement particulier) n'ont intéressé que les deux groupes spécialistes en sprint et demi-fond. Chaque sujet a participé à une séance matinale (entre 9 h et 11 h) de laboratoire d'étude selon un protocole préalablement expérimenté au service de Neurophysiologie au 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) [11], 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) [12].

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.

2.2.2. Détentes verticales et 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) [13] était le premier à proposer l'utilisation de trois tests : « squat jump » (SJ), « contre mouvement jump » (CMJ) et « drop jump » (DJ).

Nous avons préféré limiter les mesures de sauts avant et après la saison sportive aux groupes des sprinteurs et celui de demi-fond afin d'avoir des résultats de comparaison intergroupe dans une même discipline sportive (athlétisme). Nous avons donc mesuré le SJ, le CMJ, l'indice de puissance (IP) et le temps de contact avec le sol après rebondissement.

2.2.3. Mesure de la force maximale des soléaires

Pour la même raison, nous avons limité les mesures de la force avant et après la saison sportive aux mêmes groupes d'athlètes (sprinteurs et demi-fond), chez qui, nous avons mesuré le (1RM) des jambes ou « maximum sur une répétition » qui correspond à la charge maximale que le sportif ne peut soulever par ses jambes qu'une seule fois et qui correspond donc à la force maximale des soléaires. Toutes les mesures ont été effectuées après une récupération de quelques minutes juste après les tests de détente.

2.3. Programmes d'entraînement

Pour former nos 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 aérobie et anaérobie 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 aérobie augmentait 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.

2.4. Instrumentation

Grâce 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 cutanées placées sur la ligne médiane, l'une juste au-dessous de la masse des jumeaux, l'autre 5 cm plus bas. 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 présynaptique, les neurotransmetteurs sont libérés dans la fente synaptique de la synapse Ia- α MN, provoquant des potentiels postsynaptiques 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. Sachant que H_{max} est une estimation du nombre de motoneurones α (α MN) qu'on est capable de recruter grâce à l'activation de toutes les unités motrices à contraction lente, voire intermédiaires [14], et que M_{max} est l'activation musculaire maximale du pool des α MN en entier (activation de toutes les unités motrices, y compris les unités à contraction rapide) [14], on a calculé le taux ($H_{max}/M_{max} \times 100$) afin de quantifier les éventuelles variations de la réponse réflexe H par rapport à la réponse motrice M. Le SJ et le CMJ ont été mesurés grâce à un tapis de Bosco. 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 du saut. La précision et la fiabilité de la mesure sont comprises entre élevée et très élevée [15].

Une moyenne de trois tests pour chaque type de saut a été enregistrée, et toutes les mesures ont succédé les enregistrements électromyographiques après un échauffement sans étirements (quelques essais préliminaires ont été nécessaires pour familiariser les participants avec le tapis).

Pour le 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 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 SJ. 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'IP selon la formule : $IP = CMJ - SJ$ [16]. 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 SJ et une différence faible sont considérés comme « explosifs », car aptes à développer beaucoup de force dans un peu du temps [17]. Pour la mesure du temps de contact avec le sol, le sportif se laisse tomber après le saut CMJ sur le tapis pour rebondir les mains sur la hanche.

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 posées sur les cuisses du sportif et soulevées par les pointes du pied (position assise avec mains croisées sur la poitrine). 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.

2.5. Analyses statistiques

Avant la comparaison statistique, toutes les données ont été testées pour la distribution normale par un test de Kolmogorov-Smirnov. Toutes les comparaisons intergroupes au début et à la fin de la saison sportive ont été évaluées en utilisant une Anova. Pour l'analyse des comparaisons avant et après les 10 mois d'entraînement, le test post-hoc Scheffe a été utilisé lorsque 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 et figures.

Pour étudier les associations et les forces de liaisons entre les paramètres électromyographiques (H_{max} , M_{max} , H_{max}/M_{max}) et les paramètres physiques (SJ, CMJ, IP, CT, F_{max}), une corrélation de Pearson a été effectuée chez les athlètes avant et après la saison sportive.

3. Résultats

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, $24,07 \pm 0,42$ ans, taille, $172,6 \pm 1,63$ cm, poids, $66,92 \pm 0,99$ 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). Les comparaisons intergroupes par test post-hoc Scheffe des moyennes des paramètres réflexologiques (H_{max} et $H_{max}/M_{max} \times 100$) mesurées en septembre (début de la saison sportive) se sont révélées significatives à ($p < 0,05$) (Tableau 1). La valeur

Tableau 1 Moyennes des variables et comparaison multiple entre les 4 groupes de sportifs.

Variables	Moyennes (M $\pm$ SEM)		Comparaison intergroupe (Diff. M $\pm$ SEM)		
Hmax (mv)	S	3,37 $\pm$ 0,41	S	D	2,30 $\pm$ 0,52 ^a
				N	4,64 $\pm$ 0,52 ^a
	D	5,67 $\pm$ 0,47	D	F	3,05 $\pm$ 0,52 ^a
				N	2,34 $\pm$ 0,52 ^a
Mmax (mv)	F	6,42 $\pm$ 0,25	N	F	0,75 $\pm$ 0,52 ^a
	N	8,01 $\pm$ 0,26		F	1,58 $\pm$ 0,52 ^a
	S	15,50 $\pm$ 1,51		D	0,34 $\pm$ 1,60
				N	3,77 $\pm$ 1,60
Hmax/Mmax (%)	D	15,84 $\pm$ 1,26	D	F	3,31 $\pm$ 1,63
				N	4,11 $\pm$ 1,60
	F	12,05 $\pm$ 1,54	N	F	3,65 $\pm$ 1,48
	N	11,72 $\pm$ 0,41		F	0,46 $\pm$ 1,48
	S	21,35 $\pm$ 1,54	S	D	14,27 $\pm$ 2,11 ^a
				N	47,37 $\pm$ 2,11 ^a
	D	35,63 $\pm$ 0,73	D	F	31,48 $\pm$ 2,15 ^a
				N	33,10 $\pm$ 2,11 ^a
	F	52,84 $\pm$ 1,31	N	F	17,21 $\pm$ 2,15 ^a
	N	68,73 $\pm$ 2,67		F	15,88 $\pm$ 2,15 ^a

S : athlètes sprinteurs ; D : athlètes de demi-fond ; F : footballeurs ; n : nageurs ; Hmax : amplitude maximale de l'onde H du soléaire ; Mmax : amplitude maximale de l'onde M du soléaire ; M : moyenne arithmétique ; Diff. M : différence des moyennes ; SEM : erreur standard moyenne, Anova bilatérale.

^a Différence des moyennes significative ($p < 0,05$).

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 $\pm$ 0,73 %). Alors que la plus petite valeur moyenne a été observée dans le groupe des sprinteurs (21,35 $\pm$ 1,54 %) spécialistes des entraînements de type anaérobie (Tableau 1).

L'analyse des différences des moyennes rapportées dans le Tableau 2, 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. Ainsi, après cette période d'entraînement, Hmax et Hmax/Mmax ont vu leurs valeurs moyennes diminuées significativement, respectivement de 1,21 $\pm$ 0,24 mv ($p < 0,05$) dans le groupe des sprinteurs, et augmentées de 0,39 $\pm$ 0,62 mv ($p < 0,05$) dans le groupe demi-fond. Cependant, Mmax a augmenté significativement dans les deux groupes respectivement de (0,14 $\pm$ 0,23 mv et 0,13 $\pm$ 1,59 mv, $p < 0,05$) (Tableau 2).

Nous avons enregistré des augmentations des valeurs moyennes des détentes SJ et CMJ, qui sont plus significatives dans le groupe des sprinteurs que dans le groupe des athlètes de demi-fond. Chez ces derniers, l'IP a augmenté significativement de (0,73 $\pm$ 0,09 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 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 CMJ a vu sa valeur moyenne augmenter significativement

chez les sprinteurs plus que chez les athlètes demi-fond (0,02 $\pm$ 0,04 s versus 0,01 $\pm$ 0,03 s, $p < 0,05$) (Tableau 2).

Les comparaisons dans le Tableau 2 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 kg versus 145,28 $\pm$ 4,82 kg) comme après les 10 mois d'entraînement (129,92 $\pm$ 3,67 kg versus 130,57 $\pm$ 3,70 kg), 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 $\pm$ 0,28 kg et 0,64 $\pm$ 0,58 kg) (Tableau 2).

En ce qui concerne la comparaison des valeurs moyennes intergroupes, excepté la non signification 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 2).

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.

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 3).

Tableau 2 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.

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 ^a	5,67 ± 0,47	6,07 ± 0,48 ^a	2,30 ± 0,62 ^a	3,91 ± 0,52 ^a
Mmax (mv)	15,50 ± 1,51	15,64 ± 1,46 ^a	15,84 ± 1,26	15,97 ± 1,15 ^a	0,34 ± 1,97	0,33 ± 1,86
Hmax/Mmax (%)	21,35 ± 1,54	13,95 ± 1,14 ^a	35,63 ± 0,73	38,93 ± 0,62 ^a	0,14 ± 0,01 ^a	0,24 ± 0,01 ^a
SJ (cm)	58,39 ± 0,99	61,77 ± 1,17 ^a	43,48 ± 1,89	45,36 ± 1,99 ^a	14,91 ± 2,48 ^a	16,41 ± 2,82 ^a
CMJ (cm)	63,00 ± 1,03	65,73 ± 1,05 ^a	53,33 ± 1,96	55,95 ± 2,08 ^a	9,66 ± 2,64 ^a	9,78 ± 2,83 ^a
IP (cm) = CMJ—SJ	4,60 ± 0,20	3,95 ± 0,27 ^a	9,85 ± 0,61	10,58 ± 0,65 ^a	5,24 ± 0,64 ^a	6,63 ± 0,70 ^a
CT (s)	0,48 ± 0,011	0,45 ± 0,04 ^a	0,51 ± 0,01	0,50 ± 0,01 ^a	0,03 ± 0,01 ^a	0,04 ± 0,01 ^a
Fmax (kg)	143,21 ± 4,82	145,28 ± 4,82 ^a	129,92 ± 3,67	130,57 ± 3,70 ^a	13,28 ± 6,06 ^a	14,71 ± 6,08 ^a

S : sprinteurs ; D : athlètes de demi-fond ; pré : avant la saison d'entraînement de 10 moi ; post : après la saison d'entraînement de 10 moi ; Hmax : amplitude maximale de l'onde H ; Mmax : amplitude maximale de l'onde ; M : *squat jump* ; CMJ : contre mouvement jump IP : indice de puissance du soléaire ; Fmax : force maximale du soléaire ; M : moyenne arithmétique ; Diff. M : différence des moyennes ; SEM : erreur standard moyenne.

^a Différence des moyennes significative ($p < 0,05$).

Tableau 3 Corrélations entre les paramètres électromyographiques et les variables physiques pour toutes les mesures effectuées avant et après la saison sportive chez les athlètes sprinteurs et de demi-fond.

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

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.

^a La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

^b La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

4. Discussion et conclusion

Le présent travail cherche à montrer, par le biais de la mesure du réflexe H, l'effet de l'entraînement sportif sur la plasticité neuronale spinale et ses implications sur la performance en force et en puissance.

Toutes les comparaisons intergroupes des moyennes (Hmax et Hmax/Mmax $\times$ 100) rapportées dans le [Tableau 1](#) se sont révélées significatives à ($p < 0,05$) et montrent que la moyenne de Hmax est plus grande chez les nageurs de longues distances spécialisés en endurance et est plus petite chez les sprinteurs plus habitués à l'entraînement anaérobie explosif. Ainsi, les rapports calculés Hmax/Mmax sont-ils d'autant plus grands chez les sujets pratiquant des sports d'endurance comme c'est le cas pour les 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, celui 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 la.

De même, cette étude a montré que les réflexes H des soléaires sont plus petits chez les athlètes pratiquant des entraînements à dominance explosive. Cette variation, comme en témoignent les comparaisons des moyennes ([Tableaux 1 et 2](#)) peut être associée à des différences dans le type d'entraînement et le niveau de chargement des membres inférieurs en explosivité, force et puissance et non pas au sexe. À cet égard, 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 et après la saison sportive ([Tableau 3](#)) révèlent, d'une part, que toutes les associations bilatérales sont significatives

($p < 0,01$) et, d'autre part, que les performances en détentes (SJ, CMJ) et en Fmax sont liées à une dépression de Hmax et Hmax/Mmax (r de Pearson négatif) et que l'augmentation de IP et de CT est liée à une augmentation de Hmax et Hmax/Mmax (r de Pearson positif).

Les résultats s'avèrent donc intéressants puisqu'ils permettent de soutenir l'idée que la dépression Hmax/Mmax observée chez les sportifs non endurants (sprinteurs) par rapport aux sportifs endurants pourrait être liée à la fois à une inhibition présynaptique conduisant à un décrétement des influx excitateurs provenant des afférences la [18] et probablement aussi à une diminution de l'excitabilité du pool motoneurone α (α MN) [3] comme ceci a été rapporté dans d'autres études [19].

En fait, les changements enregistrés dans le réflexe H par les charges dues aux différents entraînements physiques chez les différents sportifs trouvent logiquement leur interprétation, comme le suggère aussi la littérature, dans cette modification au niveau spinal du lien direct entre les afférences la et les motoneurones α (α MN). En effet, l'inhibition présynaptique modifie la libération de neurotransmetteurs au niveau de la synapse la- $(\alpha$ MN) et peut se traduire par une diminution du réflexe H [10]. En outre, l'hypothèse du type de contrôle présynaptique change avec le type d'entraînement subi comme le montre les résultats des comparaisons intergroupes révélés très significatifs ([Tableau 1](#)).

Les résultats du [Tableau 2](#) laissent penser que l'entraînement continu des sprinteurs, contrairement à celui des coureurs de demi-fond, fait diminuer l'onde H du soléaire de $1,21 \pm 0,24$ mv, $p < 0,05$, vraisemblablement en raison d'être continuellement mis sous des grandes charges d'entraînement en termes de puissance explosive pour augmenter la force maximale de leurs jambes (Fmax s'améliore de $2,07 \pm 0,28$ kg, $p < 0,05$) et performer dans les mouvements très rapides (CT s'améliore de $0,02 \pm 0,0$ s, $p < 0,05$). 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 (puissance contractile explosive).

De même, l'entraînement physique systématique de l'endurance ou de l'explosivité peut induire une éventuelle transition en unités motrices ou en 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 2) 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 motrices à 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.

Si les résultats de cette étude ne pourraient être explicitement interprétés que par l'inhibition réflexe du pool de motoneurones, expliquant ainsi les dépressions du réflexe H, une adaptation des propriétés intracellulaires des α -motoneurones serait également envisageable, 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 [20].

Sur la base de tous ce qui précède, on pense que l'entraînement physique influence spécifiquement l'excitabilité des neurones moteurs spinaux, raison pour laquelle on pourrait admettre que le type d'entraînement à long terme agit sur les paramètres réflexe H sans avoir un effet significatif sur la réponse motrice M. Il permet d'engendrer des changements au niveau synaptique, myotypologique et neuromusculaire affectant le niveau de performance en force, puissance, explosivité et endurance.

Ainsi, le ratio ($H_{max}/M_{max} \times 100$) peut sans aucun doute être considéré comme un indicateur du niveau d'excitabilité réflexe du pool motoneuronale (αMN) : sa valeur dépend du taux de facilitation des transmissions entre les fibres la et les motoneurones alpha comme l'ont suggéré aussi Burke et al. [8] et Schieppati [7]. Ce rapport pourrait aussi servir pour le suivi des entraînements des qualités physiques et la détection des meilleurs sportifs dont la musculature répond par une meilleure adaptation à l'endurance, à la résistance ou à l'explosivité. Toutefois, rien n'empêche de penser que des sujets n'ayant pas les caractéristiques de H_{max}/M_{max} d'une discipline avant entraînement n'excelleront pas dans celle-ci car ils seront de bons répondants à l'entraînement. Inversement des sujets ayant un profil H_{max}/M_{max} semblant les rendre disposés à cette discipline peuvent ne pas répondre à l'entraînement.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Gajewski J, Mazur-Różycka J. The H-reflex as an important indicator in kinesiology. *Human movement* 2016;17:64–71.
- [2] Koceja DM, Markus CA, Trimble MH. Postural modulation of the soleus H reflex in young and old subjects. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;97:387–93.
- [3] 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.
- [4] Kyrolainen H, Komi PV. Neuromuscular performance of lower limbs during voluntary and reflex activity in power- and endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1994;69:233–9.
- [5] 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.
- [6] Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol* 2002;92:2309–18.
- [7] Schieppati M. Le Hoffmann réflexe : un moyen d'évaluer la colonne vertébrale excitabilité réflexe et son contrôle descendant dans l'homme. *Prog Neurobiol* 1987;28:345–76.
- [8] Burke D, Gandevia SC. Properties of human peripheral nerves: implications for studies of human motor control. *Prog Brain Res* 1999;123:427–35.
- [9] Zehr EP. Considerations for use of the Hoffmann reflex in exercise studies. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:455–68.
- [10] Nielsen J, Kagamihara Y. The regulation of presynaptic inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *J Physiol* 1993;464:575–93.
- [11] Buchthal F, Schmalbruch H. Contraction times of twitches evoked by H-reflex. *Acta Physiol Scand* 1970;80:378–82.
- [12] Paillard J. Analyse électrophysiologique et comparaison, chez l'Homme, du réflexe de HOFFMANN et du réflexe myotatique. *Pflüger Archiv, Bd 1955;260:448–79*. Aus dem Centre d'études de Physiologie nerveuse Paris.
- [13] Asmussen E, Bonde-Petersen F. Storage of elastic energy in skeletal muscle in man. *Acta Physiol Scand* 1974;91:385–92.
- [14] Goulart F, Valls-Solé J, Alvarez R. Posture-related changes of soleus H-reflex excitability. *Muscle Nerve* 2000;23:925–32.
- [15] Moir G, Shastri P. Intersession reliability of vertical jump height in women and men. *J Strength Cond Res* 2008;22:1779–84.
- [16] Bosco C. L'effetto del pre-stiramento sul comportamento del muscolo scheletrico e considerazioni fisiologiche sulla forza esplosiva. In *Atleticastudi jan-fev 7–117* traduction Insep n° 644; 1985.
- [17] Haddad M. Impact de l'entraînement pliométrique lors des divers créneaux intermittents courts-courts sur l'explosivité chez les jeunes Taekwondoïstes. *Tunis: ISSP Ksar Said; 2008*.
- [18] Macefield G, Hagbarth KE, Gorman R, Gandevia SC, Burke D. Decline in spindle support to α -motoneurons during sustained voluntary contractions. *J Physiol* 1991;440:497–512.
- [19] 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. *Cambr Phys Med Rehabil* 2009;90:1218–28.
- [20] Kernell D, Monster AW. Motoneurone properties and motor fatigue. An intracellular study of gastrocnemius motoneurons of the cat. *Exp Brain Res* 1982;46:197–204.