



Effets physiologiques du microcourant et de son application pour maximiser les réponses aiguës et les adaptations chroniques à l'exercice physique

Stefan Kolimechkov¹ - Marcos Seijo¹ - Ian Swaine¹ - Jack Thirkell² - Juan C. Colado³ - Fernando Naclerio¹ 

Reçu : 5 septembre 2022 / Accepté : 11 novembre 2022 / Publié en ligne : 18 novembre 2022

© The Author(s) 2022

Résumé

Le microcourant est une électrothérapie non invasive et sûre appliquée par le biais d'une série de courants électriques sub-sensoriels (moins de 1 mA), qui sont d'une magnitude similaire aux courants générés de manière endogène par le corps humain. Cette revue se concentre sur l'examen des mécanismes physiologiques médiant les effets du microcourant lorsqu'il est associé à différentes modalités d'exercice (par exemple, l'endurance et la force) chez des individus physiquement actifs et en bonne santé. La littérature examinée suggère que les mécanismes candidats suivants pourraient être impliqués dans l'amélioration des effets de l'exercice lorsqu'il est associé au microcourant : (i) augmentation de la resynthèse de l'adénosine triphosphate, (ii) maintien de l'homéostasie du calcium intercellulaire qui, à son tour, optimise les adaptations structurelles et morphologiques induites par l'exercice, (iii) déclenchement d'un effet semblable à celui des hormones, qui augmente la sécrétion de catécholamine qui, à son tour, améliore la lipolyse induite par l'exercice et (iv) amélioration de la synthèse des protéines musculaires. Chez les personnes en bonne santé, malgré le manque de normalisation sur la façon dont le microcourant est associé à l'exercice (par exemple, si le microcourant est pulsé ou continu), il existe des preuves concernant ses effets sur la réduction de la graisse corporelle, le remodelage et la croissance des muscles squelettiques ainsi que sur l'atténuation des douleurs musculaires à retardement. Le plus grand obstacle à la compréhension des effets combinés du microcourant et de l'exercice est la variabilité des protocoles mis en œuvre, ce qui rend encore plus difficile l'identification des mécanismes, des schémas optimaux de courant(s) et de la méthodologie d'application. Les études futures devraient standardiser les protocoles de microcourant en décrivant avec précision le courant utilisé [par exemple, l'intensité (μA), la fréquence (Hz), le temps d'application (minutes) et la durée du traitement (par exemple, semaines)] pour des résultats d'exercice spécifiques, par exemple, la force et la puissance, l'endurance et le gain de masse musculaire ou la réduction de la graisse corporelle.

Mots clés Stimulation électrique des nerfs par microcourant - Subsensoriel - Stimulation électrique non invasive par micro-ampères - Courbatures à retardement - Épaisseur du muscle - Lipolyse - Composition corporelle

Abréviations

ATP Adénosine triphosphate
 β_3 -AR β_3 -Adréno-récepteur
AMPC adénosine monophosphate cyclique
DOMS Détresse musculaire à déclenchement différé

HSL Lipase sensible aux hormones
Hz Hertz (un cycle par seconde)
 μA Microampère (10^{-6} ampères)
mTORC1 Cible mammalienne du complexe 1 de la rapamycine
MCT Traitement microcourant
MENS Stimulation électrique des nerfs microcourants

mA Milliampère

Communiquée par Michael I Lindinger.

* Fernando Naclerio
f.j.naclerio@greenwich.ac.uk

¹ Centre for Exercise Activity and Rehabilitation, Institute for Lifecourse Development, School of Human Sciences, Université de Greenwich, Londres, Royaume-Uni.

² Département des sciences biologiques, École de la vie et des sciences de l'environnement, Royal Holloway University of

Introduction

Le corps humain fonctionne via la bioélectricité en utilisant des courants de l'ordre du pico-ampère (pA 10^{-12} A), du nano-ampère (nA 10^{-9} A) et du micro-ampère (μ A 10^{-6} A), qui sont essentiels.

pour tous les processus de guérison (Al-Tubaikh 2018). Ceci a été bien documenté par Robert Becker, " le père de l'électromédecine " grâce à ses recherches sur les salamandres (Becker et Selden 1985). Dans le corps humain, les bio-courants sub-sensoriels influencent la croissance, l'adaptation et la réparation des tissus, en optimisant toutes les fonctions physio- logiques, y compris la signalisation du système nerveux, la croissance musculaire et le remodelage (Poltawski et Watson 2009). L'application d'un courant sub-sensoriel non invasif, généré de manière externe, connu sous le nom de thérapie par microcourant (TMC), a été développée dans les années 1970. Dans la littérature, le microcourant est désigné sous plusieurs pseudonymes, dont la stimulation électrique des nerfs par microcourant (MENS), la thérapie électrique par microcourant, le courant continu de faible intensité et la stimulation par micro-ampérage à basse tension (Belanger 2015). Cependant, quelles que soient les terminologies, le microcourant décrit un courant de micro-ampérage compris entre 1 et 999 μA , (c'est-à-dire $< 1 \text{ mA}$; 10^{-3} A) appliqué avec des fréquences comprises entre 0,5 et 100 Hz. Les courants électriques de cette ampleur sont insuffisants pour exciter les nerfs moteurs (Lambert et al. 2002). L'application de la TMC pour promouvoir la santé est basée sur la loi d'Arndt-Schulz, qui stipule que les stimuli électriques faibles augmentent les activités physiologiques tandis que les stimuli électriques forts les inhibent (Al-Tubaikh 2018). Il a été démontré que la thérapie par microcourant favorise l'augmentation des taux de synthèse tissulaire, l'angiogenèse et la germination neuronale (Poltawski et al. 2012). En outre, l'application de microcourant stimule la biogenèse mitochondriale en augmentant la production d'adénosine triphosphate (ATP) et l'activité lipolytique du tissu adipeux viscéral et sous-cutané (Noites et al. 2015). Ainsi, dans des études animales et humaines, l'application de la TME a été associée à plusieurs processus anaboliques ou de guérison, à savoir : (i) la stimulation de la croissance et de la restauration des tissus (Zizic et al. 1995), (ii) la diminution de l'œdème (Cook et al. 1994), (iii) l'augmentation de la différenciation de la myogenèse (Ohno et al. 2019) et (iv) la promotion de la synthèse des protéines musculaires (Moon et al. 2018 ; Ohno et al. 2019).

Bien que divers effets thérapeutiques liés à l'application de microcourant ait été rapportée, à notre connaissance, il y a encore peu de recherches décrivant les effets de la combinaison du TCM avec l'exercice physique. Par conséquent, l'objectif de cette revue était de résumer les mécanismes physiologiques médiant les effets de la combinaison régulière de MCT avec différents types de modalités d'exercice sur l'énergie cellulaire et les adaptations induites par l'exercice. De plus, une discussion plus approfondie sur les mécanismes potentiels associés aux TCM chez les individus physiquement actifs et en

bonne santé est présentée.

Différences dans la façon dont le microcourant est appliqué chez l'homme

L'une des variables les plus déroutantes ayant un impact sur les résultats de l'ECM est le courant lui-même. En plus de l'amplitude du courant, s'il s'agit d'un courant pulsé, il est important de connaître la durée de l'impulsion.

la fréquence de l'impulsion, la longueur de l'impulsion (c'est-à-dire la largeur d'impulsion), la forme de l'impulsion, la direction de l'impulsion, la durée (temps) de la stimulation. Certaines formes d'onde sont extrêmement complexes, avec des variations d'amplitude, de fréquence, de largeur d'impulsion et de polarité au cours d'un cycle de traitement. Malheureusement, de nombreuses recherches ne décrivent pas correctement les caractéristiques du courant appliqué, ce qui rend difficile l'élucidation de la configuration optimale du courant à appliquer dans différentes circonstances et pour différents résultats, par exemple pour maximiser l'adaptation à l'exercice (comme l'hypertrophie ou la réduction de la graisse corporelle), accélérer la récupération ou atténuer les dommages musculaires induits par l'exercice. En outre, l'emplacement des électrodes pourrait également être une source potentielle de confusion. Néanmoins, le schéma de traitement de certains appareils à micro-courant tels que l'Arc4Health utilisé par Naclerio et al. (2021) et Naclerio et al. (2019) comprend l'administration de courants électriques omniprésents cycliques entre les impulsions positives et les impulsions négatives (c'est-à-dire la polarité directe et la polarité inverse). Par conséquent, un nombre presque égal d'impulsions sera délivré dans chaque direction, ce qui aura un impact sur le corps humain de manière omniprésente, sans que l'on puisse s'attendre à des différences liées à la manière dont les électrodes sont fixées.

A notre connaissance, aucune étude n'a examiné les effets de l'utilisation de l'eau sur la santé.

l'impact des caractéristiques actuelles et l'efficacité associée aux résultats attendus. Les sections suivantes passent en revue les caractéristiques des prototypes de microcourant utilisés, les résultats associés et le mécanisme d'action probable.

Application de la thérapie par microcourant chez les patients et avantages potentiels pour les personnes en bonne santé physiquement actives

La thérapie par microcourant est utilisée dans un cadre clinique depuis de nombreuses années, et son origine remonte à quelques siècles, lorsque des feuilles chargées électrostatiquement étaient utilisées pour traiter les affections cutanées telles que les lésions et les ulcères de la peau (Belanger 2015). Certains des premiers articles publiés dans des revues à comité de lecture ont fait état des effets positifs du TCM pour traiter les varices et les ulcères cutanés chez l'homme (Assimacopoulos 1968 ; Wolcott et al. 1969). Les muscles et la peau blessés ont été signalés comme ayant leurs propres "bio-courants de blessure", qui jouent un rôle majeur dans la réparation des blessures (Foulds et Barker 1983). En effet, toutes les cellules du corps humain génèrent des mini-courants qui facilitent le fonctionnement cellulaire (Vanhaesebroeck

2006). Les cellules des tissus peuvent générer des champs électriques extracellulaires qui semblent contrôler la cicatrisation des plaies (Zhao et al. 2006) en provoquant un flux de charges positives allant jusqu'à + 70 mV dirigé vers le centre de la plaie (Vanhaesebroeck 2006). La thérapie par microcourant a un potentiel inexploité dans la guérison des tissus dysfonctionnels en raison de sa capacité à imiter les faibles "courants de blessure" bioélectriques naturels et à améliorer ensuite la réparation des plaies (Poltawski et Watson 2009). En outre, dans le cadre de la

cadre clinique La TCM a été largement appliquée chez les patients pour réduire et soulager les douleurs des sinus (Goldsobel et al. 2019 ; Maul et al. 2019), les douleurs et démangeaisons chroniques des cicatrices cutanées (Perry et al. 2010 ; Ud-Din et al. 2013), les douleurs chroniques du dos (Lerner et Kirsch 1981) et les douleurs liées aux déchirures partielles de la coiffe des rotateurs (Vrouva et al. 2019).

Comme décrit dans la Fig. 1, le paramètre primaire du MCT est le courant électrique, qui dans les fluides tels que ceux trouvés dans le corps humain, se manifeste comme un flux de particules chargées (ions). Les ions sont attirés par les charges électriques opposées (négatives à positives et positives à négatives) ; par conséquent, la cathode et l'anode des électrodes placées sur le corps humain sont attirées par le courant électrique.

La peau repousse les ions de charge similaire et attire les ions de charge opposée. Le flux d'électrons à travers les fils conducteurs se produit en raison des différentes charges entre les pôles de la batterie, créant ainsi une différence de potentiel qui déplace les électrons (Watson et Nussbaum 2021). La direction du flux ionique dans le tissu est opposée à celle des électrons. Ce courant sub-sensoriel imite les signaux électriques présents dans les tissus vivants (Poltawski et Watson 2009), et il est caractérisé par sa fréquence, sa forme, sa largeur et la direction de l'impulsion, ainsi que par la durée du stimulus appliqué.

L'application de MCT sur la peau de rat, à l'aide de courants allant de 50 μA à 1000 μA , a permis d'augmenter de manière significative l'ATP, entre

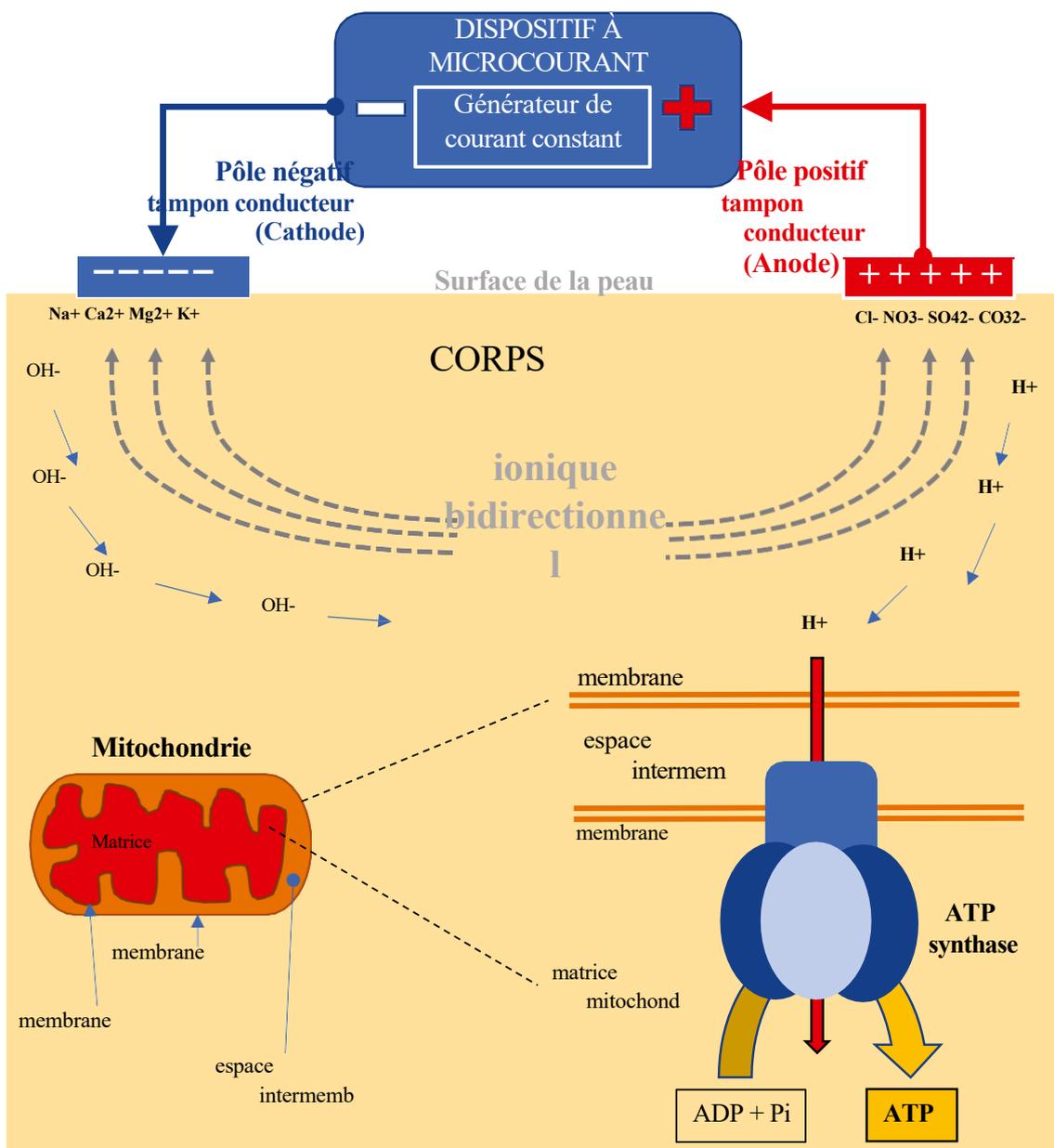


Fig. 1. Courant électrique sous-cutané obtenu et formation bioélectrique (ionique) subséquente d'ATP provoquée par l'application d'un microcourant. *ATP*
Adénosine Triphosphate, *Pi* Phosphate inorganique

trois et cinq fois. Le niveau optimal de courant, provoquant la plus forte augmentation de la concentration d'ATP, se situait entre 100 et 500 μA . En effet, la concentration d'ATP s'est stabilisée avec des courants dépassant 1000 μA , et a diminué avec des courants de 5000 μA (Cheng et al. 1982). L'augmentation de la production d'ATP peut être expliquée par les mouvements des protons (H^+). Ceci est décrit par la théorie chimiosmotique de Mitchell (Mitchell 1976), qui stipule que la concentration de protons à travers la membrane interne des mitochondries peut être utilisée pour phosphoryler l'ADP en ATP (la réaction ATP synthase synthétise l'ATP par translocation de H^+). En présence d'un microcourant constant, deux électrodes sont fixées à la surface de la peau, ce qui entraîne deux flux opposés de courant ionique (courant ionique bidirectionnel) ; voir Fig. 1. Les ions positifs se déplacent vers l'électrode négative (cathode), et les ions négatifs se déplacent vers l'électrode positive (anode). En même temps, deux processus électrochimiques différents de décomposition des molécules de H_2O se produisent au niveau des électrodes fixées à la surface de la peau. Tout d'abord, deux molécules de H_2O à l'électrode négative (cathode) reçoivent un total de deux électrons et se décomposent en une molécule d'hydrogène (H_2) et un ion hydroxyle (OH^-). C'est le processus de réduction par hydrolyse cathodique : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}^-$. Dans le second processus, deux molécules de H_2O donnent à l'électrode positive (anode) un total de quatre électrons et se décomposent en une molécule d'oxygène et quatre ions hydrogène (H^+). C'est le processus d'hydrolyse de l'anode, l'oxydation : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Des protons se forment du côté anodique, et se déplacent de l'anode (+) vers la cathode (-). Ce flux d'ions hydrogène positifs vers l'électrode négative est proposé comme un mécanisme d'augmentation de la production d'ATP dans la mitochondrie. Les molécules d'ATP sont formées par la H^+ -ATPase lorsqu'elles atteignent la membrane mitochondriale (Cheng et al. 1982).

Il a été démontré que la capacité de la CTM à augmenter l'ATP dans le tissu stimulé chez des individus physiquement actifs et en bonne santé augmente l'énergie disponible pour les cellules, ce qui peut faciliter le gain et le maintien de la masse musculaire tout au long de la vie et améliorer les performances en améliorant la récupération après les séances d'exercice chez les athlètes. Par rapport à un traitement fictif, les chercheurs ont montré que l'application de TCM dans des essais aigus atténue les marqueurs de dommages musculaires (Curtis et al. 2010 ; Kwon et al. 2017 ; Lambert et al. 2002), et réduit l'épuisement perçu induit par l'exercice (Stosslein et Kuypers 2022). En effet, deux essais contrôlés randomisés ont confirmé l'effet positif de l'ECM pour atténuer la perception des douleurs musculaires à retardement (DOMS, un marqueur de dommages musculaires) chez les

athlètes entraînés à la résistance (Naclerio et al. 2019) et les athlètes d'endurance (Naclerio et al. 2021). Un autre avantage proposé des TCM pour les individus actifs en bonne santé est son effet pour réduire la graisse corporelle. Une réduction significative de la graisse abdominale viscérale et sous-cutanée a été observée chez des étudiantes universitaires après 5 semaines de MCT ajoutées à 30 minutes d'exercice physique.

exercice aérobique (Noites et al. 2015). De même, notre étude avec des athlètes d'endurance a suggéré que la mise en œuvre de MCT post-exercice pendant 3 h sur une période de 8 semaines a diminué la graisse des membres inférieurs par rapport à l'exercice seul (Naclerio et al. 2021).

appliquée par voie transcutanée était de ~ 12-20 %, 12-12 % et ~ 10-13 %, respectivement. À l'inverse, des réductions plus faibles de la graisse viscérale (~ 7 %) et abdominale (~ 4 %) ont été observées dans le groupe n'effectuant que des exercices ($n = 9$). De même, notre groupe de recherche a analysé l'effet de l'utilisation de MCT pendant 3 heures après l'exercice ou pendant la période de l'exercice.

Effets du microcourant dans l'amélioration des effets de l'exercice physique

Contexte général

Des études antérieures (Balakatounis et Angoules 2008 ; Iijima et Takahashi 2021 ; Lambert et Burgess 2004 ; Mercola et Kirsch 1995 ; Poltawski et Watson 2009 ; Yu et al. 2014) se sont concentrées sur les effets du TME pour soulager la douleur et favoriser la guérison des tissus. À notre connaissance, il y a peu de recherches concernant les effets mécanistes de la combinaison du microcourant avec l'exercice pour optimiser ses effets chez des individus sains et non blessés. La combinaison de la TMC avec l'exercice a été supposée améliorer la performance de l'exercice, la récupération et les changements morphologiques ou structurels dans les muscles squelettiques (Kwon et al. 2017 ; Naclerio et al. 2019). Les mécanismes proposés associés au TCM sont : (i) le réapprovisionnement en ATP (Cheng et al. 1982), (ii) le maintien de l'homéostasie du calcium intercellulaire qui, à son tour, optimise les adaptations structurelles et morphologiques induites par l'exercice (Lambert et al. 2002), et (iii) le déclenchement d'un effet semblable à celui d'une hormone qui augmente la sécrétion de catécholamines (Al-Tubaikh 2018). Le tableau 1 résume les principales caractéristiques, la taille de l'échantillon de l'étude et les effets documentés des protocoles de TCM appliqués dans les études humaines.

Effet du microcourant sur la graisse corporelle et la lipolyse induite par l'exercice physique

Seul un petit nombre d'études a analysé l'impact de la combinaison des TCM avec des interventions d'exercice sur la graisse corporelle et la lipolyse induite par l'exercice. Une réduction significative de la graisse abdominale viscérale et sous-cutanée a été observée chez de jeunes étudiantes universitaires (18-30 ans) lors de l'utilisation de TCM pendant ou peu après la fin d'un exercice d'endurance de 30 minutes par rapport à la réalisation de l'exercice seul (Noites et al. 2015). Le MCT a été appliqué localement (deux fois par semaine pendant 5 semaines, total de 10 séances) sur la région abdominale avec des courants compris entre 1 et 999 μA , délivrés entre 25 et 50 Hz de fréquence. Le pourcentage de réduction de la graisse abdominale viscérale et sous-cutanée pour les trois groupes ($n = 8-9$) utilisant la CTM

Tableau 1 Effets des TCM sur l'adaptation à l'exercice chez l'homme

Étude	Description de l'étude	Design	Paramètres du microcourant	Placement des électrodes	Population	Effets
(Stosslein et Kuivners 2022)	Étude contrôlée (deux études croisées à sens unique, n = 20)	Essai aigu : MCT 30 min post-exercice (entraînement à la résistance)	700 µA avec une fréquence spécifique de 0,3-3,5 Hz	4 points anatomiques : haut de la fesse, bas de la fesse, bas du dos, haut du cou	Hommes de 18 à 40 ans ayant une expérience de l'entraînement en résistance	↑ auto-évaluation du bien-être, reposé, sociable. ↓ Sentiment d'épuisement dû à l'exercice physique.
(Vilarinho et al. 2022)	Étude contrôlée (MCT : n = 18 ; Sham : n = 20)	Essai aigu : 40 min de MCT avant l'exercice suivi de 50 min d'exercice aérobique modéré sur un cyclo-ergomètre	1000 µA avec une fréquence de 25 Hz pendant les 20 premières minutes, suivie de 10 Hz pendant les 20 dernières minutes.	Région abdominale	Age moyen des hommes et femmes (étudiants universitaires)	Aucune différence dans la lipolyse
(Naclerio et al. 2021)	Étude contrôlée (MCT : n = 9 ; Sham : n = 9)	Essai à long terme : 3 h/jour de MCT + entraînement d'endurance × 8 semaines	50-400 µA avec une fréquence de ~1000 Hz	Jambe dominante	Athlètes masculins de 18 à 45 ans pratiquant le cross-country	Changements positifs de la composition corporelle : ↓ graisse des jambes avec une tendance à l'augmentation. ↓ graisse du corps entier → ↓ masse corporelle ↓ DOMS
(Piras et al. 2021)	Étude contrôlée (n = 10)	Essai aigu : 20 min MCT avant l'exercice et 20 min après l'exercice	400 µA avec une fréquence de 256 Hz de forme d'onde rectangulaire (1 s de durée d'impulsion)	Jambe droite (quadriceps) en utilisant des gants transducteurs pour masser les quadriceps.	Des hommes et des femmes en bonne santé, âgés de 27,2 ± 3,6 ans et actifs sur le plan récréatif.	Récupération plus rapide après un exercice de cyclisme
(Naclerio et al. 2019)	Étude contrôlée (MCT : n = 9 ; Sham : n = 9)	Essai à long terme : 3 h/jour MCT + entraînement en résistance × 8 semaines	50-400 µA avec une fréquence de ~1000 Hz	Jambe dominante	18-45 ans Hommes entraînés	Maximisation des changements architecturaux musculaires ↓ DOMS
(Kwon et al. 2017)	Étude contrôlée (MCT : n = 19 ; Sham : n = 19)	Essai aigu : 40 min MCT avec tests de la fonction musculaire avant et après	25 µA avec une fréquence de 8 Hz courant alternatif avec un format d'impulsion rectangulaire monophasique.	8 points anatomiques du bras et de la jambe dominants	Hommes et femmes âgés de 65 ans et plus	Amélioration de certaines fonctions musculaires : ↑ force de préhension
(Noites et al. 2017)	Étude contrôlée (MCT : n = 42 ; Sham : n = 41)		n = 8 ;	Essai aigu : 40 min de TCM + 60 min de séance d'aérobic d'intensité modérée		700-999 µA avec une fréquence de 25 Hz pendant les 20 premières minutes et de 10 Hz pendant les 20 dernières minutes.
(Noites et al. 2015)	Étude contrôlée (MCT-1 : n = 9 ; MCT-2 : n = 9 ; MCT-3 : n = 7 ; MCT-4 :		8 ;	Essai à long terme : 30 min de MCT + 30 min d'exercices aérobiques d'intensité modérée (deux fois par semaine pendant 5 semaines, 10 séances au total)		courant électrique à l'aide d'électrodes à bande transcutanée
			Sham ;			1-999 µA avec une fréquence de 25-10 Hz et 25-50 Hz (micro courant monophasique et rectangulaire avec changement de polarité

toutes les secondes)

Région abdominale
inférieure Hommes âgés
de 18 à

Induit la lipolyse

30 ans et
f
e
m
m
e
s

Induit la lipolyse et
fournit des effets
additifs à l'exercice
aérobie sur la
diminution du tissu
adipeux.

i
a
n
t
e
s

u
n
i
v
e
r
s
i
t
a
i
r
e
s
)

Région abdominale :
femmes de 18 à 30 ans
(étudiants
universitaires)

	Description de	Design	Paramètres du	Placement des	Population	Effets
1	Étude contrôlée $n = 35$ (MCT sur une jambe ; Sham sur l'autre)	Essai aigu : 20 min de MCT (microcourant à fréquence spécifique) après des contractions musculaires excentriques sur une machine à jambes assise	200 μA avec des fréquences différentes sur les canaux A et B	Jam	Hommes et femmes âgés de 20 à 40 ans, en bonne santé et actifs	\downarrow DOMS
3	Étude contrôlée (MCT : $n = 15$; Sham : $n =$	Essai aigu : 96 h de TME (thérapie par microcourant électromembranaire) après contractions excentriques des muscles fléchisseurs non dominants du coude.	20 μA	Exercice du bras	29,5 ans âge moyen hommes en bonne	\downarrow DOMS
ert et al. 2002)	Étude contrôlée (MCT : $n = 9$; Sham : $n = 9$)	Essai aigu : 20 min de F	200 μA avec une fréquence de 30 Hz pendant 10 min, suivi de 100 μA avec une fréquence de 0,3 Hz	Exercice du bras	20,3 ans âge moyen hommes ($n = 3$) et femmes ($n = 15$) en	Aucun effet bénéfique sur le DOMS
et al. 1999)						

menté, \rightarrow maintenu, \downarrow diminué.

matin les jours sans entraînement pendant 8 semaines chez 18 athlètes masculins de cross-country (Naclerio et al. 2021). Le protocole de microcourant utilisait une plage d'intensité de 50 à 400 μA avec une fréquence fondamentale de ~ 1000 Hz. Par rapport au traitement non-MCT (uniquement l'entraînement, $n = 9$), les athlètes alloués au groupe MCT ($n = 9$) ont significativement ($p < 0,05$) diminué la graisse des membres inférieurs et ont montré une tendance ($p > 0,05$ et $< 0,1$) à réduire la graisse du corps entier (Naclerio et al. 2021).

Noites et al. (2017) ont étudié l'effet aigu d'une combinaison de MCT et d'un exercice d'endurance sur des étudiants universitaires de sexe masculin et féminin âgés de 18 à 30 ans, présentant un poids normal ou supérieur à la normale (indice de masse corporelle compris entre 18,5 et 29,9 kg/m^2). Les participants ont reçu une stimulation par microcourant trans-abdominal (groupe MCT, $n = 42$) ou un placebo (groupe exercice seul, $n = 41$) pendant 40 minutes avant d'effectuer une seule séance d'exercice aérobique modéré. Le protocole MCT avait une intensité comprise entre 700 et 999 μA avec une fréquence de 10–25 Hz. Bien que les deux groupes (MCT et placebo) aient montré des augmentations significatives ($p < 0,01$) et des tailles d'effet importantes ($d = 2,75$ et 2.5 respectivement) dans les niveaux de glycérol sérique induits par l'exercice qui ont été utilisés comme marqueur de lipolyse indiquant l'hydrolyse des triglycérides (Lafontan et Langin 2009), les valeurs élevées mesurées dans le groupe MCT étaient significatives par rapport à celles mesurées dans le groupe placebo ($+ 0,15 \pm 0,09$ vs. $0,09 \pm 0,07$ mmol/l , $p = 0,03$). Cependant, plus récemment, par rapport à un traitement fictif ($n = 20$), aucun effet lipolytique n'a été observé en réponse à une application de 40 min de MCT (≤ 1000 μA à 10 et 25 Hz) avant 50 min d'exercice d'endurance d'intensité modérée ($n = 18$) chez des étudiants universitaires (Vilarinho et al. 2022). D'autres études, utilisant des échantillons de plus grande taille, similaires à ceux utilisés par Noites et al. (2017) (c'est-à-dire $n = \sim 40$ par traitement), comparant l'efficacité de différents protocoles MCT administrés avec différents courants et fréquences sont nécessaires pour établir l'effet lipolytique du MCT, ainsi que le moment optimal d'application (par exemple, avant, pendant, après le temps d'exercice). De plus, afin d'explorer l'effet lipolytique du MCT, soit administré seul ou combiné avec l'exercice, des investigations utilisant des individus avec différents niveaux d'adiposité (c'est-à-dire des participants en surpoids et obèses) sont nécessaires.

L'effet chronique du MCT pour augmenter l'exercice-L'activité lipolytique induite chez des individus sains (Noites et al. 2017, 2015) peut s'expliquer par les courants potassiques voltage-dépendants des cellules adipeuses humaines (Ramirez-Ponce et al. 2003), ce qui rend la lipolyse plus sensible au MCT. Par exemple, la

combinaison d'une stimulation électrique légère ($1,4 \pm 0,1$ V/cm) et d'un choc thermique induit par des électrodes en caoutchouc électroconductrices et thermogénératives a réduit l'adiposité viscérale chez des patients atteints du syndrome métabolique et du diabète de type 2 (Kondo et al. 2014). Il a été démontré que des courants encore plus élevés (4 mA) augmentent de manière significative la lipolyse chez l'homme, et cet effet pourrait s'expliquer par l'activation de l'adénosine cyclique.

monophosphate (cAMP), qui stimule ensuite la lipolyse (Hamida et al. 2011). Bien que le mécanisme exact par lequel les TCM peuvent réduire l'adiposité locale n'ait pas été entièrement compris, il pourrait être expliqué par l'effet stimulant des TCM sur le système nerveux sympathique (SNS). L'objectif principal du SNS est de stimuler la réponse de combat ou de fuite du corps, tout en restant constamment actif pour maintenir l'homéostasie (Motiejunaite et al. 2021). Il a été suggéré que la thérapie par microcourant exerce des "effets semblables à ceux d'une hormone" causés par une augmentation de la sécrétion de catécholamines (noradrénaline) par le neurone sympathique postganglionnaire du système nerveux et la protéine G de la membrane cellulaire (Al-Tubaikh 2018). Les neurones postganglionnaires s'étendent sur la majeure partie du corps humain, et lorsque les courants réagissent avec eux, la sécrétion de noradrénaline augmente, se liant sur le β 3-adréno-récepteur (β 3-AR), qui à son tour convertit l'ATP en AMPc dans les adipocytes (Noites et al. 2017), voir la figure 2. L'augmentation de la concentration d'AMPc active l'enzyme protéine kinase A (PKA), qui promeut la lipolyse en stimulant les réactions catalysées par la lipase triglycéride adipeuse (ATGL), sensible aux hormones.

lipase (HSL), et la lipase monoglycéride (MGL). En bref, comme décrit à la figure 2, les triglycérides sont ensuite décomposés à l'intérieur de la gouttelette lipidique en un acide gras libre et un diglycéride par l'enzyme ATGL. Ensuite, le diglycéride est métabolisé en un acide gras libre et un monoglycéride par l'enzyme HSL, et le monoglycéride restant est finalement métabolisé en un acide gras libre et une molécule de glycérol par l'enzyme MGL. Ainsi, le MCT semble induire la lipolyse tout au long de la stimulation du neurone sympathique postganglionnaire (Fig. 2). Les molécules de glycérol et d'acides gras libres sont ensuite libérées de l'adipocyte dans la circulation sanguine.

Dans l'ensemble, il existe des preuves suggérant que le MCT combiné à un exercice d'endurance peut stimuler davantage la lipolyse induite par l'exercice. Cependant, le peu de preuves disponibles nous empêche de faire des recommandations concluantes sur les protocoles lipolytiques efficaces optimaux. Néanmoins, les TCM avec des intensités de 50 à 999 μ A et des fréquences entre 10 et 1000 Hz ont démontré être bénéfiques pour activer la lipolyse.

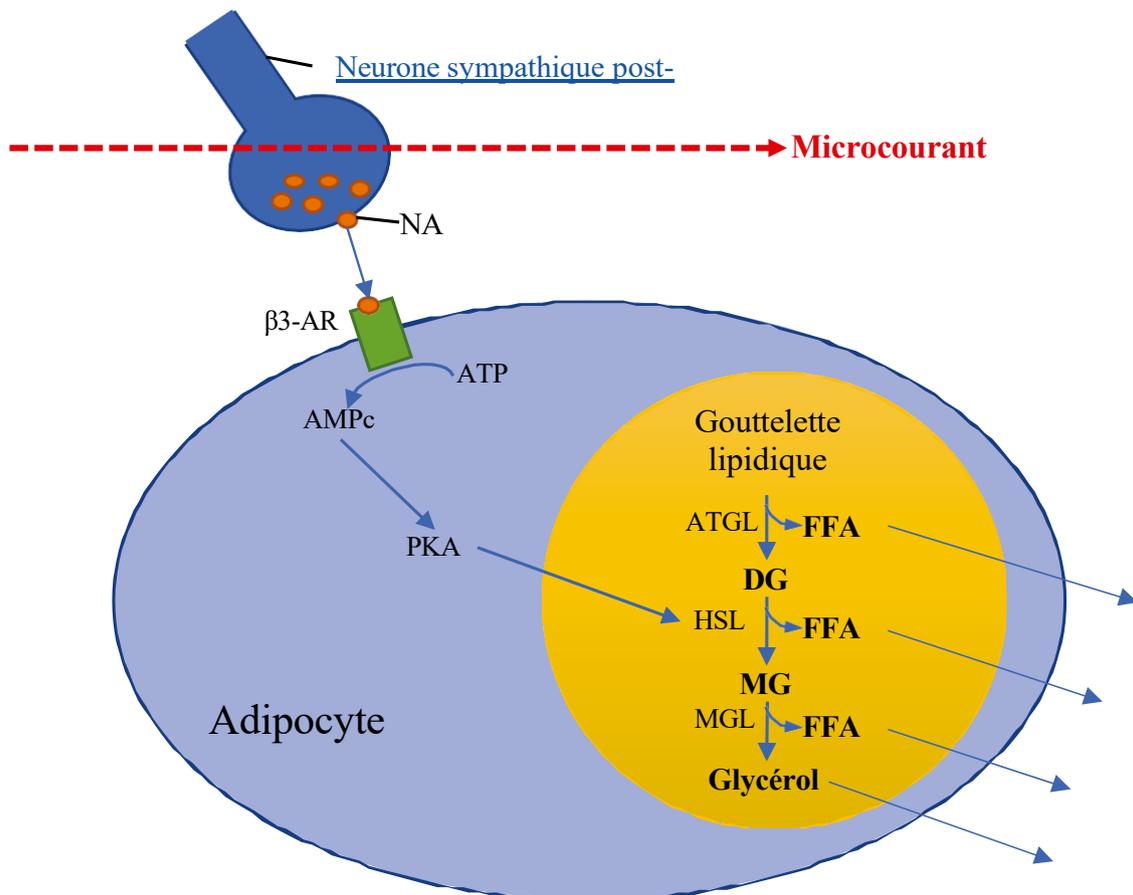


Fig. 2. Représentation schématique de la lipoly-

sis induite par le microcourant. NA noradrénaline, β 3-AR bêta3 adréno-récepteur, ATP

adénosine triphosphate, *cAMP* adénosine monophosphate cyclique, *PKA* protéine

kinase A, TG, DG et, MG tri-, di, et monoglycérides, ATGL, HSL, et MGL enzymes lipolytiques, *FFA* acides gras libres

Effet du microcourant sur le remodelage, la structure et la taille des muscles squelettiques

Plusieurs études basées sur des animaux ont exploré les effets de la TMC sur les muscles skel- etaux (Fujiya et al. 2015 ; Moon et al. 2018 ; Ohno et al. 2019, 2013 ; Park et al. 2018). In vitro, la MCT avec une intensité de 10 μA appliquée pendant 15-60 min et 20 μA pendant 15-30 min a augmenté de manière significative le con- tent de protéines des myotubes par rapport au niveau de contrôle non traité. De plus, la TME a régulé à la hausse l'isoforme MM de la créatine kinase (marqueur de la différenciation myo-génique), montrant des signes d'amélioration de la réparation des mem- branes dans les muscles squelettiques préalablement blessés (Ohno et al. 2019). Ces résultats soutiennent l'application de la TCM comme traitement potentiel pour la réhabilitation des blessures. On a émis l'hypothèse que la MCT induirait des signaux intracellulaires impliqués dans la synthèse des pro- teines des muscles squelettiques atrophiés et/ou blessés. Un protocole MCT de 60 min avec une intensité de 10 μA et une fréquence de 0,3 Hz réalisé sur trois jours non consécutifs a facilité la repousse du muscle soléaire atrophié chez la souris (Ohno et al. 2013). De même, un protocole MCT identique mis en œuvre trois fois par semaine pendant trois semaines a facilité la régénération du muscle tibialis anterior lésé chez la souris (Fujiya et al. 2015). Ces études susmentionnées ont fortement suggéré une stimulation potentielle de l'ECM sur la prolifération des cellules satellites musculaires. En effet, deux études ultérieures menées sur des lapins (Moon et al. 2018 ; Park et al. 2018), utilisant un protocole MCT similaire (appliqué pendant 60 min par jour pendant 2 semaines) ont démontré un effet régénératoire plus important dans le muscle gastrocnemius atrophié. Le protocole MCT de plus faible intensité (20 μA) a favorisé un plus grand effet régénératoire du muscle atrophié du lapin par rapport à la haute intensité (5000 μA) ou au sham (Park et al. 2018).

Chez les patients dont c'est la première intervention sur le ligament croisé antérieur. rupture, l'ECM a réduit l'atrophie des fibres musculaires squelettiques du quadriceps (Toth et al. 2020). Cela suggère que la TCM opti- mise la régénération cellulaire et atténue par conséquent l'altération de la taille des fibres musculaires et de la contractilité qui est nettement réduite trois semaines après la chirurgie. En accord avec les études vétérinaires précédentes (Fujiya et al. 2015 ; Ohno et al. 2019, 2013 ; Park et al. 2018), l'intervention susmentionnée chez l'homme soutient les avantages de la TCM pour accélérer la guérison post-chirurgicale et atténuer l'atrophie musculaire chez l'homme.

À notre connaissance, une seule étude menée dans notre laboratoire a analysé l'effet de l'ajout de la CTM à l'entraînement en résistance chez de jeunes hommes sains

s'entraînant de manière récréative (Naclerio et al. 2019). Un effet additif potentiel de la CTM pour optimiser l'hypertrophie (élargissement de l'épaisseur musculaire et de l'angle de pennation) a été observé dans les muscles vastus medialis, vastus lateralis et brachialis chez de jeunes hommes entraînés à la résistance après 8 semaines de CTM (3 h par jour avec une intensité de 50 et 400 μA , et une fréquence de ~ 1000 Hz) après l'entraînement ou le matin de l'entraînement.

jours de non-entraînement (Naclerio et al. 2019). L'augmentation de l'épaisseur du muscle et l'augmentation de l'angle de pénétration des fibres musculaires permettent d'obtenir une plus grande surface de fibres pour un volume de muscle donné et, par conséquent, un plus grand nombre de ponts croisés actine-myosine potentiellement activés, ce qui entraîne une plus grande force et une meilleure génération de force (Suetta et al. 2008). Par conséquent, il semble que la TME post-entraînement puisse créer des effets hypertrophiques sommatifs induits par le microcourant en optimisant l'augmentation de l'épaisseur du muscle et des angles de pénétration plus importants. Néanmoins, il convient de souligner que les différences observées entre les deux groupes d'intervention n'étaient pas statistiquement significatives. Bien que l'entraînement soit considéré comme le stimulus le plus efficace pour obtenir des résultats liés à l'exercice (par exemple, hypertrophie, amélioration de la fonction musculaire, etc.) (Bischoff-Ferrari et Dawson-Hughes 2019), la durée du programme d'entraînement, c.-à-d. 8 semaines, chez des participants bien entraînés, peut être considérée comme suffisante pour susciter l'adaptation observée à l'entraînement. Néanmoins, une telle durée d'entraînement pourrait encore être insuffisante pour provoquer des différences statistiquement significatives produites par l'application de MCT par rapport aux adaptations obtenues par l'intervention d'entraînement seule.

L'effet mécaniste du TCM sur les muscles squelettiques pourrait être expliqué par son effet stimulant sur la sécrétion de noradrénaline, qui a été proposé comme un mécanisme supplémentaire pour promouvoir la synthèse des protéines musculaires (Navegantes et al. 2002). Il a été proposé que la sécrétion de catécholamines soit augmentée après l'application de MCT (Noites et al. 2017). Par exemple, une augmentation de la sécrétion de noradrénaline a été récemment signalée chez les souris après une stimulation transcrânienne par courant direct (Mishima et al. 2019). La noradrénaline est généralement associée à la stimulation de la lipolyse (voir la figure 2) et de la glycogénolyse par une augmentation de l'AMPc intracellulaire. Des preuves considérables suggèrent également que les catécholamines peuvent avoir un effet anabolique sur le métabolisme des protéines des muscles squelettiques (Navegantes et al. 2002). En outre, la noradrénaline peut augmenter le taux de synthèse des protéines dans les muscles oxydatifs, ce qui conduit à une accréation accrue de protéines (Navegantes et al. 2002). Nous avons émis l'hypothèse que l'augmentation de la sécrétion de noradrénaline par le MCT augmente la synthèse des protéines musculaires en utilisant des voies similaires à celles du clenbutérol. Des revues précédentes ont rapporté que l'administration orale de clenbutérol induit une hypertrophie du muscle crânien chez

différentes espèces (Mersmann 1998). En effet, il a été bien documenté que le clenbutérol est l'une des principales voies impliquées dans la synthèse des protéines, qui favorise l'hypertrophie par l'activation du complexe 1 de la cible mammalienne de la rapamycine (mTORC1) (Vainshtein et Sandri 2020). De même, nous supposons que la sécrétion de noradrénaline potentiellement induite par le MCT déclencherait des voies intracellulaires contribuant à stimuler davantage la synthèse des protéines (Fig. 3).

Effet du microcourant sur les douleurs musculaires à retardement induites par l'exercice (DOMS)

Les douleurs musculaires à retardement sont associées à une gêne et à une raideur musculaires après une activité physique intense (Cleak et Eston 1992). Le DOMS est décrit comme un tissu musculaire perturbé et douloureux en plus d'une réponse inflammatoire (Connolly et al. 2003). Le DOMS a été attribué à la perturbation de l'homéostasie du calcium, à la rupture des fibres musculaires et à la mise à feu des nerfs IV en réponse aux produits de l'activité des macrophages et aux contenus intracellulaires accumulés dans l'interstitium (Armstrong 1984 ; Radak et al. 2012). Cependant, des recherches récentes suggèrent une forte implication du tissu conjonctif (Wilke et Behringer 2021). Le fascia profond, en particulier, serait intimement lié au muscle squelettique sous-jacent et pourrait donc être endommagé (souffrant de micro-ruptures et d'inflammation) lors de séances d'exercices intenses et inhabituels et de l'utilisation de l'énergie.

par la suite, susciter la perception d'inconforts post-exercice (Wilke et Behringer, 2021).

Bien que différents traitements aient été proposés pour atténuer la sévérité du DOMS, leur efficacité reste inconsistante avec des résultats positifs et négatifs (Connolly et al. 2003). Des études ont démontré que la TME peut réduire la sévérité des symptômes de dommages musculaires induits par l'exercice chez diverses populations après l'achèvement de protocoles d'exercices aigus et à long terme (Tableau 1). Par exemple, la thérapie par microcourant électromembranaire appliquée pendant une période de 96 heures a réduit la gravité des symptômes du DOMS chez des hommes en bonne santé dans un essai en double aveugle contrôlé par placebo après avoir effectué des contractions excentriques des muscles fléchisseurs du coude non dominant (Lambert et al. 2002). De même, l'application d'une TMC utilisant une fréquence spécifique (une modalité de TMC comprenant une liste particulière de fréquences conçues pour cibler des tissus spécifiques ou des conditions liées à la santé) pendant 20 minutes a atténué la perception du DOMS dans l'étude de la TMC.

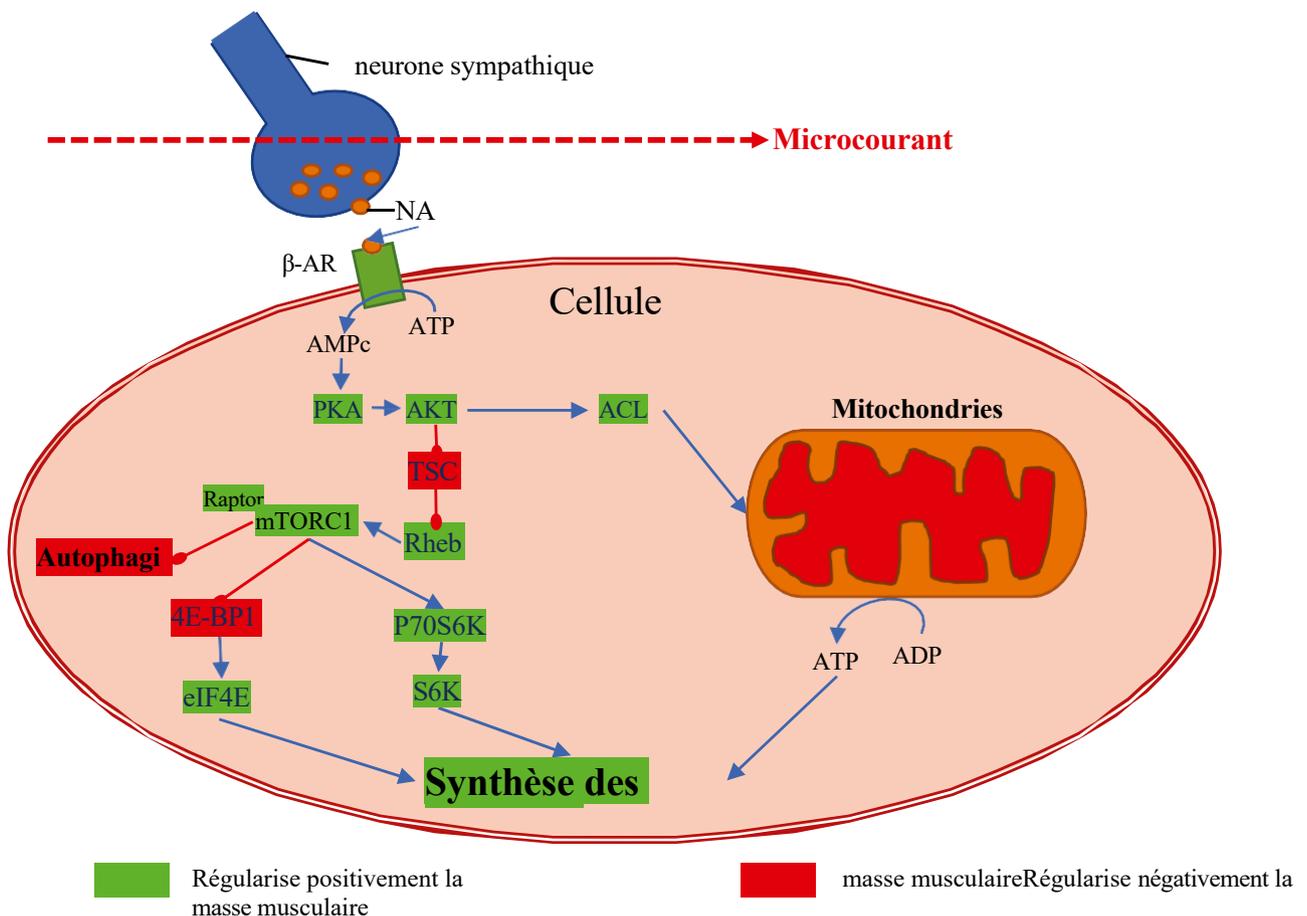


Fig. 3 Activation de la synthèse des protéines musculaires par l'application de microcourant. *NA* noradrénaline, *β3-AR* bêta3

adrénorécepteur, *ATP* adénosine triphosphate, *cAMP* adénosine monophosphate cyclique, *PKA* protéine kinase A, *AKT* protéine transformatrice/protéine kinase B, *ACL* ATP citrate lyase, *ADP*

sclérose, *Rheb* Homologue de Ras enrichi dans le cerveau, *mRORC1* Cible mammalienne du complexe 1 de rapamycine caractérisé par la présence de Rap- tor, *4E-BP1* Protéine de liaison au facteur 4E 1, *eIF4E* Facteur 4E d'initiation de la traduction eucaryote, *P70S6K* Protéine ribosomale S6 kinase bêta-1

jambe traitée par rapport à la jambe traitée de façon simulée (Curtis et al. 2010). En outre, une ECM spécifique similaire appliquée pendant 30 minutes après l'exercice chez de jeunes hommes sains (18-40 ans) entraînés à la résistance a réduit l'épuisement induit par l'exercice selon des questionnaires auto-rapportés (Stosslein et Kuypers 2022). En outre, par rapport à un traitement fictif, le MCT a significativement diminué les symptômes de DOMS sur 72 heures après l'exercice chez les athlètes masculins de cross-country (Naclerio et al. 2021) et à 12, 24 et 48 heures après avoir effectué un protocole de douleur musculaire induite par l'exercice chez les hommes entraînés à la résistance (Naclerio et al. 2019). Néanmoins, une étude utilisant seulement deux courants distincts (100 et 200 μA), avec des fréquences fixées à 0,3 et 30 Hz, et utilisant un temps d'application plus court allant jusqu'à 20 min (Allen et al. 1999), n'a rapporté aucune réduction du DOMS.

Les mécanismes par lesquels les TCM atténuent la sévérité du DOMS ne sont toujours pas clairs. Il a été proposé que l'application aiguë ou régulière d'ECM atténue les perturbations de l'homéostasie intracellulaire du calcium (Lambert et al. 2002), qui résultent des protocoles de dommages musculaires induits par l'exercice, principalement ceux comprenant un haut degré d'activation musculaire excentrique (Armstrong 1984 ; Radak et al. 2012).

Dans l'ensemble, les preuves disponibles soutiennent l'effet bénéfique du TCM pour atténuer la perception du DOMS chez les individus physiquement actifs. Les protocoles de TCM efficaces impliquent des schémas de stimulation complexes, qui délivrent simultanément des courants de différentes intensités (par exemple, 20-400 μA) et des temps d'application longs, jusqu'à 3 h.

Effets du microcourant lorsqu'il est associé à un exercice d'endurance

Il y a eu quelques études aiguës (Noites et al. 2017 ; Piras et al. 2021 ; Vilarinho et al. 2022) et à long terme (Naclerio et al. 2021 ; Noites et al. 2015) combinant MCT avec des exercices d'endurance. Par rapport à un groupe de traitement fictif ($n = 41$), l'ajout de MCT ($n = 42$) à une séance d'aérobic de 60 min a augmenté de manière aiguë la lipolyse chez des hommes et des femmes jeunes (18-30 ans). Le protocole de microcourant était réglé à une intensité comprise entre 700 et 999 μA avec des fréquences de 10-25 Hz (Noites et al. 2017). À l'inverse, une étude récente n'a rapporté aucun effet lipolytique aigu d'un protocole de MCT avant l'exercice réglé à une intensité de 1000 μA chez de jeunes étudiants universitaires (Vilarinho et al. 2022). En revanche, le TCM a été mis en œuvre chez de jeunes individus physiquement actifs (hommes et femmes âgés de $27,2 \pm 3,6$ ans) avant et après un exercice

d'endurance (Piras et al. 2021). Les auteurs ont suggéré que l'ECM avant des exercices de cyclisme d'endurance lourds améliorerait la récupération en augmentant l'extraction d'oxygène au niveau de la microvasculature musculaire. De plus, comparé à la condition de contrôle, l'ECM post-exercice a amélioré la récupération par une réactivation parasympathique plus rapide. Le TME comprenait un protocole de 20 minutes avant et après l'exercice, réglé à 400 μA et 256 Hz (Piras et al. 2021).

Malgré certaines controverses observées dans les études aiguës susmentionnées, il semble que la combinaison de la TME avec un entraînement d'endurance puisse éventuellement maximiser la lipolyse induite par l'exercice. Par exemple, la TME utilisant des courants de 1 à 999 μA , combinée à un entraînement d'endurance d'intensité modérée (deux fois par semaine pendant 5 semaines) a significativement diminué la graisse sous-cutanée mesurée par échographie chez de jeunes femmes participantes (18-30 ans), par rapport à l'exercice performant seul (Noites et al. 2015). Les effets observés ont été maintenus pendant 4 semaines après la fin de l'étude. Les auteurs ont rapporté que les protocoles de basses fréquences (10-25 Hz) sont plus favorables pour stimuler la réduction de la graisse viscérale que les fréquences plus élevées (25-50 Hz) (Noites et al. 2015). Néanmoins, il convient de souligner la diminution significative de la masse grasse des membres inférieurs du corps observée chez des athlètes masculins de cross-country qui portaient un dispositif à microcourant pendant 3 h après l'entraînement (Naclerio et al. 2021). Le protocole MCT impliquait des intensités plus faibles (50-400 μA) et des fréquences plus élevées (~ 1000 Hz) que celles appliquées dans l'essai susmentionné (Noites et al. 2015). De plus, les athlètes utilisant le MCT ont maintenu leur masse corporelle et ont montré une tendance à la diminution de la graisse du corps entier par rapport à ceux alloués dans le groupe d'entraînement sham (contrôle) (Naclerio et al. 2021).

Les données disponibles suggèrent que les TCM, combinés avec des exercices d'endurance, peut stimuler davantage le métabolisme des graisses et accélérer la récupération post-exercice. De tels bénéfices sont apparemment associés à des séances de TCM utilisant des courants faibles (50-400 μA) et élevés (1 à 999 μA) réglés à diverses fréquences. Néanmoins, les protocoles avec des fréquences plus basses (10-25 Hz) semblent plus efficaces pour maximiser la lipolyse induite par l'exercice.

Effets du microcourant lorsqu'il est associé à des exercices de résistance et de puissance

À notre connaissance, deux essais randomisés aigus (Kwon et al. 2017 ; Stosslein et Kuypers 2022) et un interventionnel (Naclerio et al. 2019) ont analysé l'effet de la TCM pour maximiser l'adaptation de la fonction musculaire résultant de l'exercice de résistance. Une augmentation aiguë significative de la force de préhension (pré $26,2 \pm 8,8$ à post $27,1 \pm 8,7$ kg, $p = 0,014$) et de l'efficacité musculaire estimée par une réduction marquée des valeurs moyennes quadratiques des signaux d'électromyographie, ainsi qu'un nombre accru de flexions plantaires (pré $28,7 \pm 9,5$ à post $34,3 \pm 6,4$ répétitions, $p =$

0,006) réalisées lors d'un test d'élévation du talon sur une seule jambe a été rapportée chez des personnes âgées ($n = 19$) après avoir reçu une TME de 40 min avec une intensité de 25 μA et une fréquence de 8 Hz (Kwon et al. 2017). De même, des améliorations significatives de la récupération auto-évaluée et de l'humeur ont été observées chez des individus entraînés à la résistance (18-40 ans, $n = 20$) après avoir reçu un post-exercice de microcourant à fréquence spécifique de 30 min avec une intensité de 200 μA et une fréquence de 8 Hz.

0,3-3,5 Hz (Stosslein et Kuypers 2022). Ces effets bénéfiques de l'ECM ont été expliqués par une meilleure homéostasie intracellulaire du Ca^{2+} et un couplage excitation-conduction dépendant du Ca^{2+} , qui pourraient être altérés après la réalisation de séances d'exercice exhaustives (Kwon et al. 2017).

La seule étude interventionnelle combinant MCT et entraînement à la résistance a été menée par notre groupe de recherche (Naclerio et al. 2019). Nos résultats suggèrent qu'un traitement MCT 3 h après l'entraînement avec des intensités fixées entre 50 et 400 μA et une fréquence ~ 1000 Hz peut optimiser certains des résultats de performance investis- gés (saut vertical et force du haut du corps). Bien qu'aucune différence entre les groupes (MCT $n = 9$ vs Sham $n = 9$) n'ait été observée pour les performances de saut vertical et de force, seul le groupe MCT a amélioré de manière significative la hauteur du saut vertical, tandis que les deux groupes, MCT et sham (seul traitement d'entraînement) ont amélioré de manière similaire la force du bench press. Il a été suggéré que des différences dans la configuration de la routine d'entraînement, impliquant un volume de travail plus important sur le bas du corps que sur la musculature du haut du corps, pourraient être à l'origine de la différence observée (Naclerio et al. 2019). Bien que spéculatif, nous supposons que le TCM peut offrir des avantages en maximisant les résultats de l'entraînement en résistance (par exemple, la force et l'hypertrophie).

Le peu de preuves disponibles concernant l'effet de combinant les TCM avec des programmes d'exercices de force et de puissance nous empêche de tirer des conclusions et des recommandations définitives. D'autres études interventionnelles utilisant des échantillons de plus grande taille [$n > 15$ par groupe comme le suggèrent les résultats observés dans l'étude de Naclerio et al. (2019)], incluant des individus athlètes et non athlètes de différents âges et disciplines sportives, sont nécessaires. Néanmoins, sur la base de la littérature disponible, il est possible de suggérer que la combinaison d'un entraînement de résistance avec le TCM en utilisant des intensités de 25-400 μA peut optimiser l'adaptation de la fonction musculaire et les résultats de performance à l'exercice.

Effets secondaires de l'utilisation du microcourant chez l'homme sain

Le MCT est une modalité sûre avec très peu d'effets secondaires documentés. Une méta-analyse récente sur l'utilisation de la TME pour réduire les douleurs musculo-squelettiques a conclu à l'absence d'effet indésirable grave de l'application de microcourant chez l'homme (Iijima et Takahashi 2021). Les auteurs ont résumé les effets indésirables d'un total de neuf essais qui ont inclus

collectivement 281 patients. Il n'y a eu qu'un seul abandon (0,4 %) dû à la perception de picotements dans les pieds après la première séance de traitement. En outre, aucun événement indésirable grave nécessitant un traitement médical n'a été signalé. Dans un essai examinant la sécurité et l'efficacité de l'ECM pour les douleurs et la congestion des sinus, il a été conclu que l'ECM est sûr et ne présente que des effets secondaires mineurs (picotements dans les pieds), qui ont été résolus.

sans intervention médicale (Goldsobel et al. 2019). Le TCM a été appliqué dans de nombreux scénarios médicaux, étant signalé comme une thérapie sûre au fil des décennies (Al-Tubaikh 2018 ; Xu et al. 2021). En effet, dans les deux études interventionnelles menées par notre groupe de recherche, aucun effet secondaire associé à l'utilisation du TCM n'a été signalé (Naclerio et al. 2021, 2019). De même, aucun effet secondaire n'a été signalé après des interventions aiguës et à long terme combinant le TCM et l'exercice physique dans les populations générales (Noites et al. 2017, 2015) et chez les personnes âgées (Kwon et al. 2017). Par conséquent, sur la base des preuves documentées, le TCM semble être une modalité de traitement sûre pour les humains en bonne santé, y compris les athlètes et les personnes âgées.

Orientations futures - nouveaux aspects à prendre en compte pour l'application du microcourant combiné à l'exercice chez l'homme

Contexte général

Les TCM combinés à l'exercice méritent une attention particulière dans les études futures axées sur l'amélioration de la santé et du bien-être. Les effets bénéfiques probables de la combinaison de l'ECM avec des interventions d'exercice pour maximiser les avantages induits par l'exercice sur la fonction musculaire (Kwon et al. 2017) et la composition corporelle (Naclerio et al. 2021 ; Noites et al. 2017, 2015) a ouvert la voie à de futures recherches dans le domaine de l'anti-âge. Il est nécessaire de standardiser la configuration des protocoles MCT qui se concentrent sur différents résultats d'exercice : (i) performance de force et de puissance, (ii) performance d'endurance, (iii) augmentation de la masse musculaire (hypertrophie), (iv) réduction de la graisse corporelle, (v) accélération de la récupération post-entraînement. Les chercheurs sont encouragés à décrire avec précision les protocoles de TCM mis en œuvre, y compris les caractéristiques du courant : intensité (μA), fréquence (Hz) et durée de chaque application singulière (minutes) et de l'ensemble du traitement (par exemple, semaines) utilisé pour maximiser les résultats attendus susmentionnés.

Le microcourant peut-il favoriser la santé et le bien-être chez l'homme ?

Les TCM ont le potentiel de réduire la sévérité du DOMS post-exercice (Curtis et al. 2010), ainsi que d'améliorer les adaptations induites par l'exercice chez les humains, par exemple améliorer la fonction musculaire, préserver ou augmenter la masse maigre, etc. (Kwon et al. 2017), réduire

les graisses (Noites et al. 2015) ou améliorer la récupération après l'exercice (Piras et al. 2021). En outre, il est prouvé que les TCM offrent de multiples avantages : amélioration de 200 % de la capacité de guérison après une blessure, réduction de la concentration sanguine de cytokines inflammatoires (Al-Tubaikh 2018), atténuation de l'inflammation de l'épaule et du genou, amélioration de la qualité de vie et de la santé.

la douleur (Iijima et Takahashi 2021), et accélérer la cicatrisation des plaies (Balakatounis et Angoules, 2008).

Le microcourant peut-il contrer le processus de vieillissement lorsqu'il est appliqué seul ou combiné à un entraînement physique ?

L'entraînement en résistance associé à un régime alimentaire sain est considéré comme la marque de la prévention et du traitement du déclin de la masse et de la fonction musculaires lié à l'âge (Bischoff-Ferrari et Dawson-Hughes 2019). Le TCM a été signalé comme une méthode pratique et efficace pour maximiser les avantages induits par l'exercice chez les personnes physiquement actives en bonne santé (Curtis et al. 2010 ; Lambert et al. 2002 ; Noites et al. 2017, 2015 ; Piras et al. 2021). Cependant, à la connaissance de l'auteur, aucune recherche formelle n'a été menée pour vérifier les effets du MCT ajouté aux exercices de résistance sur la force musculaire et la fonction physique chez les adultes d'âge moyen et plus âgés non entraînés. Par conséquent, il est important de déterminer dans quelle mesure l'application de MCT ajouté à des exercices physiques peut atténuer le déclin de la fonction musculaire lié à l'âge, aider à prévenir la sarcopénie et le processus global de vieillissement. Atténuer la perte de masse et de force musculaire liée à l'âge est essentiel pour préserver l'autonomie et la qualité de vie avec le vieillissement. La perte de masse musculaire liée au vieillissement a été signalée pour la première fois il y a près d'un siècle par Critchley (Critchley 1931), puis nommée "sarco-pénie" par Rosenberg en 1989 (Rosenberg 1989). De nos jours, la prévalence de la sarcopénie est en augmentation dans le monde entier. Les taux de sarcopénie estimés chez les personnes âgées en Europe devraient augmenter de près de 64 %, passant de 19,7 millions en 2016 à 32,3 millions en 2045 (Ethgen et al. 2017). Compte tenu des avantages potentiels précédemment décrits de l'ECM dans l'atténuation de la perte de masse musculaire et le ralentissement de la diminution progressive de la capacité fonctionnelle liée à l'âge, il est justifié de poursuivre l'étude de l'effet possible de l'ECM dans l'amélioration du bien-être et de la santé chez les personnes âgées, notamment chez celles, particulièrement à risque de sarcopénie et de fragilité physique. Cependant, les recherches évaluées par les pairs sur les effets de l'ECM chez les adultes d'âge moyen et plus âgés sont rares. Un essai clinique randomisé, en double aveugle et contrôlé par simulacre a suggéré que le microcourant peut améliorer les activités physiques et soutenir la santé et le bien-être des participants âgés (65 ans et plus) en améliorant la capacité fonctionnelle (Kwon et al. 2017). Les recherches futures devraient s'appuyer sur ces résultats et déterminer si le TCM, seul ou en combinaison avec différentes modalités d'exercice, atténue le déclin de la masse musculaire lié à l'âge et améliore la capacité fonctionnelle et le bien-être de la population âgée.

Résumé et conclusions

Les principaux mécanismes d'action déclenchés par la combinaison du TCM avec l'exercice chez les individus physiquement actifs peuvent être résumés comme suit : (i) augmentation de la resynthèse de l'ATP, (ii) le maintien de l'homéostasie du calcium intracellulaire, (iii) l'amélioration de la lipolyse induite par l'exercice et (iv) la stimulation de la synthèse des protéines musculaires.

Dans le cadre d'un entraînement physique, les TCM peuvent accélérer la récupération post-exercice, atténuer la gravité des douleurs musculaires retardées et optimiser les résultats de l'entraînement physique, par exemple la réponse hypertrophique des muscles squelettiques, les gains de force, la capacité d'endurance et la réduction de la masse grasse.

La littérature disponible suggère que les effets susmentionnés peuvent être obtenus lorsque les protocoles MCT sont appliqués en incorporant des courants compris entre 20 et 400 μA , en plus de durées d'application plus longues (> 30 min jusqu'à 3 h). Néanmoins, la variabilité des protocoles MCT analysés ajoute des défis supplémentaires dans l'identification des protocoles optimaux en termes de modèle de courant(s), de temps d'application et de durée de traitement associés aux résultats cliniques spécifiques attendus ou liés à l'exercice.

Application pratique et perspectives d'avenir

D'un point de vue pratique, le MCT peut être appliqué pendant 30-40 min avant et après des sessions d'exercices d'endurance pour stimuler de façon aiguë la lipolyse et accélérer la récupération des tissus. L'ECM peut être appliqué régulièrement pendant 3 heures après l'entraînement et à un certain moment (par exemple le matin) les jours de non-entraînement pour maximiser les adaptations induites par l'entraînement et atténuer les DOMS après avoir effectué des exercices physiques difficiles non familiers. Même si aucune recommandation concluante ne peut être faite concernant les caractéristiques optimales du courant, les cliniciens et les entraîneurs devraient envisager des intensités de courant fixées entre 20 et 400 μA pour atténuer le DOMS ou 20-999 μA avec de faibles fréquences (10-25 Hz) pour maximiser la lipolyse et la réduction des graisses.

Sur la base de la littérature actuelle, les considérations suivantes sont proposées pour les études futures :

- (i) Des interventions bien conçues, incluant des participants d'âges différents (y compris des adultes plus âgés), des disciplines sportives et des niveaux de performance différents, devraient être élaborées pour explorer les protocoles efficaces optimaux

associés à des résultats différenciés liés à l'exercice, tels que la prise de masse musculaire, la réduction de la graisse corporelle et l'amélioration de la récupération, de la force, de l'endurance ou de la puissance, ainsi que pour atténuer le déclin de la masse musculaire lié à l'âge et améliorer le bien-être.

- (ii) Afin d'identifier l'impact réel de l'utilisation du TCM seul ou combiné à l'exercice, les chercheurs sont encouragés à effectuer un contrôle approfondi de la

la configuration de la charge d'entraînement en termes d'intensité, de périodes de repos, de volume, de fréquence d'entraînement, de durée et de modalités d'exercice.

- (iii) L'impact de certaines variables courantes non contrôlées, telles que le temps et la qualité du sommeil, le bien-être mental, les habitudes alimentaires et nutritionnelles, doit également être pris en compte. Par exemple, les approches combinées comprenant l'application de TCM parallèlement à l'ingestion de compléments nutritionnels tels que des protéines de haute qualité ou du β -hydroxy- β -méthylbutyrate (HMB), qui est dépourvu d'azote et recommandé aux personnes âgées pour contrer la sarcopénie (He et al., 2016), méritent une attention particulière pour les chercheurs et les cliniciens à la recherche de stratégies efficaces pour promouvoir la santé chez les personnes âgées.

Armstrong RB (1984) Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness : a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 16(6):529-538

Assimacopoulos D (1968) Courant électrique négatif de faible intensité dans le traitement des ulcères de la jambe dus à une insuffisance veineuse chronique. Rapport préliminaire de trois cas. *Am J Surg* 115(5):683-687

Balakatounis KC, Angoules AG (2008) Low-intensity electrical stimulation in wound healing : review of the efficacy of externally applied currents resembling the current of injury. *Eplasty* 8:e28

Contributions des auteurs Tous les auteurs ont apporté une contribution substantielle à ce manuscrit.

Financement Aucun financement n'a été reçu pour aider à la préparation de ce manuscrit.

Déclarations

Conflit d'intérêts Les auteurs de ce manuscrit ne signalent aucun conflit d'intérêts. Ce travail a été accepté et approuvé par tous les auteurs.

Accès libre Cet article est placé sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License, qui permet l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur n'importe quel support ou dans n'importe quel format, à condition de créditer de manière appropriée le ou les auteurs originaux et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées. Les images ou tout autre matériel tiers figurant dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans une ligne de crédit vers le matériel. Si le matériel n'est pas inclus dans la licence Creative Commons de l'article et que l'utilisation que vous souhaitez en faire n'est pas autorisée par la réglementation en vigueur ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement auprès du détenteur des droits d'auteur. Pour consulter une copie de cette licence, rendez-vous sur <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Références

- Al-Tubaikh JA (2018) Médecine énergétique *Médecine interne : Un guide radiologique illustré* (deuxième édition). 574-577. Springer.
- Berlin Allen JD, Mattacola CG, Perrin DH (1999) Effect of microcurrent stimulation on delayed-onset muscle soreness : a double-blind.
- comparaison. *J Athl Train* 34(4):334-337

- Becker RO, Selden G (1985) *Le courant stimulant le corps électrique : l'électromagnétisme et le fondement de la vie*. William Morrow, US, p 368
- Belanger A (2015) Stimulation électrique pour la guérison et la réparation des tissus *Agents électrophysiques thérapeutiques : Evidence Behind Practice* (3e éd.). Lippincott Williams & Wilkins, États-Unis. 480
- Bischoff-Ferrari H, Dawson-Hughes B (2019) Definitions of Sarcopenia. In : Meynial-Denis D (ed) Sarcopénie Aspects moléculaires, cellulaires et nutritionnels-Applications à l'homme. CRC Press, US
- Cheng N, Van Hoof H, Bockx E, Hoogmartens MJ, Mulier JC, De Dijcker FJ, De Loecker W (1982) The effects of electric currents on ATP generation, protein synthesis, and membrane transport of rat skin. *Clin Orthop Relat Res* 171:264-272
- Cleak MJ, Eston RG (1992) Delayed onset muscle soreness : mechanisms and management. *J Sports Sci* 10(4):325-341. <https://doi.org/10.1080/02640419208729932>
- Connolly DA, Sayers SP, McHugh MP (2003) Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *J Strength Cond Res* 17(1):197-208. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2003\)017%3c0197:tapodo%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2003)017%3c0197:tapodo%3e2.0.co;2)
- Cook HA, Morales M, La Rosa EM, Dean J, Donnelly MK, McHugh P, Tepper SH (1994) Effects of electrical stimulation on lymphatic flow and limb volume in the rat. *Phys Ther* 74(11):1040-1046. <https://doi.org/10.1093/ptj/74.11.1040>
- Critchley M (1931) The neurology of old age. *Lancet* 217(5621):1119-1127. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)90705-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)90705-0)
- Curtis D, Fallows S, Morris M, McMakin C (2010) The efficacy of frequency specific microcurrent therapy on delayed onset muscle soreness. *J Bodyw Mov Ther* 14(3):272-279. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2010.01.009>
- Ethgen O, Beaudart C, Buckinx F, Bruyere O, Reginster JY (2017) La prévalence future de la sarcopénie en europe : une revendication pour une action de santé publique. *Calcif Tissue Int* 100(3):229-234. <https://doi.org/10.1007/s00223-016-0220-9>
- Foulds IS, Barker AT (1983) Human skin battery potentials and their possible role in wound healing. *Br J Dermatol* 109(5):515-522. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.1983.tb07673.x>
- Fujiya H, Ogura Y, Ohno Y, Goto A, Nakamura A, Ohashi K, Goto K (2015) La stimulation neuromusculaire électrique à microcourant facilite la régénération des muscles squelettiques blessés chez la souris. *J Sports Sci Med* 14(2):297-303
- Goldsobel AB, Prabhakar N, Gurfein BT (2019) Essai prospectif examinant la sécurité et l'efficacité de la stimulation microcourante pour le traitement de la douleur et de la congestion des sinus. *Bioelectron Med* 5:18. <https://doi.org/10.1186/s42234-019-0035-x>
- Hamida ZH, Comtois AS, Portmann M, Boucher JP, Savard R (2011) Effet de la stimulation électrique sur la lipolyse des adipocytes blancs humains. *Appl Physiol Nutr Metab* 36(2):271-275. <https://doi.org/10.1139/h11-011>
- He X, Duan Y, Yao K, Li F, Hou Y, Wu G, Yin Y (2016) Le bêta-hydroxy-bêta-méthylbutyrate, la biogenèse mitochondriale et la santé des muscles squelettiques. *Amino Acids* 48(3):653-664. <https://doi.org/10.1007/s00726-015-2126-7>
- Iijima H, Takahashi M (2021) Microcurrent therapy as a therapeutic modality for musculoskeletal pain : a systematic review accelerating the translation from clinical trials to patient care. *Arch Rehabil Res Clin Transl* 3(3):100145. <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2021.100145>
- Kondo T, Ono K, Kitano S, Matsuyama R, Goto R, Suico MA, Araki E (2014) La stimulation électrique douce avec choc thermique réduit l'adiposité viscérale et améliore les anomalies métaboliques chez les sujets atteints de syndrome métabolique ou de diabète de type 2 : essais croisés randomisés. *EBioMedicine* 1(1):80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2014.11.001>
- Kwon DR, Kim J, Kim Y, An S, Kwak J, Lee S, Park JW (2017) Short-term microcurrent electrical neuromuscular stimulation to

- améliorer la fonction musculaire chez les personnes âgées : un essai clinique randomisé, en double aveugle, contrôlé par l'effet de miroir. *Médecine (baltimore)* 96(26):e7407. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000007407>
- Lafontan M, Langin D (2009) Lipolysis and lipid mobilization in human adipose tissue. *Prog Lipid Res* 48(5):275-297. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2009.05.001>
- Lambert MI, Burgess TL (2004) Microcurrent therapy and the treatment of soft tissue injury : review article. *Intern SportMed J* 5(2):141-146
- Lambert MI, Marcus P, Burgess T, Noakes TD (2002) Electro-membrane microcurrent therapy reduces signs and symptoms of muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 34(4):602-607. <https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00007>
- Lerner F, Kirsch D (1981) A doubleblind comparative study of microstimulation and placebo effect in short term treatment of the chronic back pain patient. *J Am Chiropract Assoc* 15(11):101-106
- Maul XA, Borchard NA, Hwang PH, Nayak JV (2019) Microcurrent technology for rapid relief of sinus pain : a randomized, placebo-controlled, double-blinded clinical trial. *Int Forum Allergy Rhinol* 9(4):352-356. <https://doi.org/10.1002/alr.22280>
- Mercola J, Kirsch D (1995) The basis for microcurrent electrical therapy in conventional medical practice. *J Advanc Med* 8(2):107-120
- Mersmann HJ (1998) Overview of the effects of beta-adrenergic receptor agonists on animal growth including mechanisms of action. *J Anim Sci* 76(1):160-172. <https://doi.org/10.2527/1998.761160x>
- Mishima T, Nagai T, Yahagi K, Akther S, Oe Y, Monai H, Hirase H (2019) Transcranial direct current stimulation (tDCS) induces adrenergic receptor-dependent microglial morphological changes chez la souris. *eNeuro*. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0204-19.2019>
- Mitchell P (1976) Vectorial chemistry and the molecular mechanics of chemiosmotic coupling : power transmission by proticity. *Biochem Soc Trans* 4(3):399-430. <https://doi.org/10.1042/bst0040399>
- Moon YS, Kwon DR, Lee YJ (2018) Therapeutic effect of microcurrent sur l'atrophie des muscles du mollet chez le lapin immobilisé. *Muscle Nerve* 58(2):270-276. <https://doi.org/10.1002/mus.26110>
- Motiejunaite J, Amar L, Vidal-Petiot E (2021) Adrenergic receptors and cardiovascular effects of catecholamines. *Ann Endocrinol (paris)* 82(3-4):193-197. <https://doi.org/10.1016/j.ando.2020.03.012>
- Naclerio F, Moreno-Perez D, Seijo M, Karsten B, Larrosa M, Garcia-Merino JAL, Larumbe-Zabala E (2021) Effets de l'ajout de microcourant après l'entraînement chez les athlètes masculins de cross-country. *Eur J Sport Sci*. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1862305>
- Naclerio F, Seijo M, Karsten B, Brooker G, Carbone L, Thirkell J, Larumbe-Zabala E (2019) Efficacité de la combinaison du micro courant avec l'entraînement en résistance chez les hommes entraînés. *Eur J Appl Physiol* 119(11-12):2641-2653. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04243-1>
- Navegantes LC, Migliorini RH, do Carmo Kettelhut I (2002) Adrenergic control of protein metabolism in skeletal muscle. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 5(3):281-286
- Noites A, Moreira A, Melo C, Faria M, Vilarinho R, Freitas C, Santos R (2017) Effets aigus de l'exercice physique avec microcourant dans le tissu adipeux de la région abdominale : un essai randomisé contrôlé. *Europ J Integrat Med* 9:79-85. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2016.11.001>
- Noites A, Nunes R, Gouveia AI, Mota A, Melo C, Viera A, Bastos JM (2015) Effets de l'exercice aérobique associé au microcourant abdominal : une étude préliminaire. *J Altern Complement Med* 21(4):229-236. <https://doi.org/10.1089/acm.2014.0114>
- Ohno Y, Egawa T, Yokoyama S, Fujiya H, Sugiura T, Ohira Y, Goto K (2019) Augmentation de la teneur en protéines musculaires associée à MENS via la modulation de caveolin-3 et TRIM72. *Physiol Res* 68(2):265-273. <https://doi.org/10.33549/physiolres.933992>

- Ohno Y, Fujiya H, Goto A, Nakamura A, Nishiura Y, Sugiura T, Goto K (2013) La stimulation électrique des nerfs par microcourant facilite la repousse du muscle soléaire de la souris. *Int J Med Sci* 10(10):1286–1294. <https://doi.org/10.7150/ijms.5985>
- Park GY, Kwon DR, Moon YS (2018) La thérapie par microcourant de faible intensité favorise la régénération des muscles atrophiés du mollet chez les lapins immobilisés. *J Biomed Res*. <https://doi.org/10.7555/JBR.32.20180056>
- Perry D, Colthurst J, Giddings P, McGrouther DA, Morris J, Bayat A (2010) Treatment of symptomatic abnormal skin scars with electrical stimulation. *J Wound Care* 19(10):447–453. <https://doi.org/10.12968/jowc.2010.19.10.79092>
- Piras A, Zini L, Trofe A, Campa F, Raffi M (2021) Effets de la stimulation électrique aiguë à microcourant sur la fonction musculaire et la stratégie de récupération ultérieure. *Int J Environ Res Public Health* 18(9):4297. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094597>
- Poltawski L, Johnson M, Watson T (2012) Thérapie par microcourant dans la gestion du tennis elbow chronique : études pilotes pour optimiser les paramètres. *Physiother Res Int* 17(3):157–166. <https://doi.org/10.1002/pri.526>
- Poltawski L, Watson T (2009) Bioelectricity and microcurrent therapy for tissue healing—a narrative review. *Phy Therapy Rev* 14:104–114. <https://doi.org/10.1179/174328809X405973>
- Radak Z, Naito H, Taylor AW, Goto S (2012) Oxyde nitrique : est-il la cause des courbatures ? *Nitric Oxide* 26(2):89–94. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2011.12.005>
- Ramirez-Ponce MP, Mateos JC, Bellido JA (2003) Human adipose cells have voltage-dependent potassium currents. *J Membr Biol* 196(2):129–134. <https://doi.org/10.1007/s00232-003-0631-1>
- Rosenberg IH (1989) Summary comments : epidemiological and meth- odological problems in determining nutritional status of older per- sons. *Am J Clin Nutr* 50(5):1231–1233. <https://doi.org/10.1093/ajcn/50.5.1231>
- Stosslein BAC, Kuypers KPC (2022) Self-rated recovery and mood before and after resistance training and muscle microcurrent appli- cation. *Front Psychol* 13:836695. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.836695>
- Sueta C, Andersen JL, Dalgas U, Berget J, Koskinen S, Aagaard P (1985) Kjaer M (2008) Resistance training induces qualitative changes in muscle morphology, muscle architecture, and muscle function in elderly postoperative patients. *J Appl Physiol* 105(1):180–186. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01354.2007>
- Toth MJ, Tourville TW, Voigt TB, Choquette RH, Anair BM, Falcone MJ, Beynnon BD (2020) Utility of neuromuscular electrical stimulation to preserve quadriceps muscle fiber size and contrac- tility after anterior cruciate ligament injuries and reconstruction : a randomized, sham-controlled. *Blinded Trial Am J Sports Med* 48(10):2429–2437. <https://doi.org/10.1177/0363546520933622>
- Ud-Din S, Giddings Dip P, Colthurst J, Whiteside S, Morris J, Bayat A (2013) Réduction significative des symptômes de cicatrisation avec la stimulation électri- cale : évaluée avec des outils d'évaluation subjectifs et objectifs dans une série de cas prospective non contrôlée. *Plaies* 25(8):212–224
- Vainshtein A, Sandri M (2020) Signaling pathways that control muscle mass. *Int J Mol Sci*. <https://doi.org/10.3390/ijms21134759>
- Vanhaesebroeck B (2006) Charger les batteries pour guérir les plaies. par l'intermédiaire de PI3K. *Nat Chem Biol* 2(9):453–455. <https://doi.org/10.1038/nchembio0906-453>
- Vilarinho R, Faria SM, Monteiro PRR, Melo C, Santos R, Noites A (2022) Effets du microcourant abdominal sur la consommation et la proportion des substrats énergétiques pendant un exercice d'aérobic : une étude pilote . *Soins de santé*. <https://doi.org/10.3390/healthcare10050917>
- Vrouva S, Batistaki C, Paraskevaïdou E, Chanopoulos K, Kostopoulos D, Stamoulis E, Kostopanagioutou G (2019) Étude comparative du soulagement de la douleur par deux traitements non pharmacologiques chez des patients atteints de

- déchirures partielles de la coiffe des rotateurs : un essai randomisé. *Anesth Pain Med* 9(2):e88327. <https://doi.org/10.5812/aapm.88327>
- Watson T, Nussbaum E (2021) *Electrophysical Agents. Evidence-based Practice* (13ème ed). Elsevier
- Wilke J, Behringer M (2021) Is "delayed onset muscle soreness" a false friend ? the potential implication of the fascial connective tissue in post-exercise discomfort. *Int J Mol Sci* 22(17):9482. <https://doi.org/10.3390/ijms22179482>
- Wolcott LE, Wheeler PC, Hardwicke HM, Rowley BA (1969) Accelerated healing of skin ulcer by electrotherapy : preliminary clinical results. *South Med J* 62(7):795-801. <https://doi.org/10.1097/00007611-196907000-00008>
- Xu X, Zhang H, Yan Y, Wang J, Guo L (2021) Effets de la stimulation électrique sur la surface de la peau. *Acta Mech Sin*. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-01026-2>
- Yu C, Hu ZQ, Peng RY (2014) Effets et mécanismes d'un pansement microcurrent sur la cicatrisation des plaies cutanées : une revue. *Mil Med Res* 1:24. <https://doi.org/10.1186/2054-9369-1-24>
- Zhao M, Song B, Pu J, Wada T, Reid B, Tai G, Penninger JM (2006) Electrical signals control wound healing through phosphatidylinositol-3-OH kinase-gamma and PTEN. *Nature* 442(7101):457-460. <https://doi.org/10.1038/nature04925>
- Zizic TM, Hoffman KC, Holt PA, Hungerford DS, O'Dell JR, Jacobs MA et al (1995) The treatment of osteoarthritis of the knee with pulsed electrical stimulation. *J Rheumatol* 22(9):1757-1761

Note de l'éditeur Springer Nature reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.