



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



MISE AU POINT

Les effets de la stimulation transcrânienne à courant continu (STCC) sur les performances physiques : une revue systématique de la littérature



The effects of tDCS on physical performances: A systematic literature review

S. Bornheim^{a,b,*}, J.L. Croisier^{a,b}, V. Leclercq^c, C. Baude^b,
J.F. Kaux^{a,b}

^a Département de médecine physique et réhabilitation, centre hospitalier universitaire de Liège, Liège, Belgique

^b Département des sciences de la motricité, Liège université, Liège, Belgique

^c Département de santé publique, épidémiologie et économie de la santé, Liège université, Liège, Belgique

Reçu le 2 avril 2020 ; accepté le 12 mai 2020

Disponible sur Internet le 15 juillet 2020

MOTS CLÉS

STCC ;
Revue systématique ;
Athlètes ;
Force ;
Endurance

Résumé

Objectifs. – La technique de stimulation transcrânienne à courant continu apparaît de plus en plus fréquemment dans la littérature. L'objectif de cette revue de la littérature est donc de recenser et analyser les essais contrôlés randomisés portant sur les effets de la stimulation transcrânienne sur la force musculaire et l'endurance musculaire.

Matériels et méthodes. – Deux bases de données (Medline et Scopus) ont été consultées pour identifier des essais contrôlés randomisés, portant sur les effets de la stimulation transcrânienne sur des paramètres de force et d'endurance chez des sujets sains. La qualité des études a été évaluée par l'échelle de PEDro. Numéro d'enregistrement du protocole de recherche PROSPERO : CRD42018118053.

Résultats. – Trente-six essais contrôlés randomisés, dont 12 en simple aveugle ont été inclus, totalisant 542 sujets. Treize des 23 articles évaluant les effets de la STCC sur l'endurance montrent un effet positif. D'une manière semblable, 8 des 19 articles évaluant les effets de la STCC sur la force montrent un effet positif.

* Auteur correspondant. Liège université, ISEPK, Bat B21, Sart-Tilman, 4000 Liège, Belgique.
Adresse e-mail : stephen.bornheim@ulg.ac.be (S. Bornheim).

KEYWORDS

tDCS;
 Systematic review;
 Athletes;
 Strength;
 Endurance

Conclusion. — Malgré une grande diversité dans les paramètres de stimulation (notamment l'emplacement des électrodes) et les méthodes d'évaluation des effets de la stimulation transcrânienne, il semblerait que la stimulation transcrânienne est une méthode non invasive, peu onéreuse avec peu d'effets indésirables. Elle pourrait donc qui pourraient être un adjuvant intéressant lors des entraînements pour améliorer les performances physiques.

© 2020 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Summary

Objectives. — Transcranial direct current stimulation has been gaining momentum in the scientific literature. The objective of this literature review was therefore to identify and analyze randomized and controlled trials on the effects of transcranial stimulation on muscle strength and muscular endurance.

Materials and methods. — Two databases (Medline and Scopus) were used to search for randomized controlled trials on the effects of transcranial stimulation on parameters of strength and endurance in healthy subjects. Their quality was assessed by the PEDro scale. PROSPERO registration number: CRD42018118053.

Results. — Thirty-six randomized controlled trials, 12 of which were single-blind, were included, totaling 542 subjects. Thirteen of 23 articles evaluating the effects of tDCS on endurance show a positive effect. Similarly, 8 of 19 articles evaluating the effects of tDCS on strength show a positive effect.

Conclusion. — Despite a great diversity in the parameters of stimulation (notably the electrodes) and the methods for evaluating the effects of transcranial stimulation, it seems that transcranial stimulation is a non-invasive, safe, inexpensive method with few undesirable effects which could be an interesting adjunct during training to improve physical performance.

© 2020 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

De nombreux facteurs peuvent influencer les performances des athlètes. Certains sont physiologiques [1] (VO₂max, manque de sommeil, fatigue supra-spinale, efficacité neuromusculaire, etc.), d'autres psychologiques (la fatigue mentale peut augmenter la perception de la difficulté de l'effort, et diminuer la motivation) [2]. Au-delà de la préparation physique et mentale pour des épreuves sportives, certains adjuvants peuvent s'avérer intéressants pour permettre aux athlètes de se dépasser. C'est donc à ce titre que nous nous intéressons à la stimulation transcrânienne à courant direct (ou STCC).

Non invasive, avec très peu d'effets secondaires (picotements, hyperhémie locale paroxystique, légère sensation de brûlure) et peu onéreuse [3], cette technique devient de plus en plus populaire dans le traitement de maladies neurologiques (AVC [4], maladie de Parkinsons [5]) ou psychologiques [6]. En modifiant le potentiel membranaire de repos, cette technique permet non seulement de rendre plus excitable (ou moins excitable selon le type de montage) une région cérébrale [7], mais elle permet aussi une augmentation du flux sanguin cérébral local [8] et une augmentation de la connectivité de régions cérébrales plus ou moins espacées [9]. Ceci facilite donc non seulement l'apprentissage de nouvelles tâches [10], mais si elle est répétée de manière suffisamment régulière elle pourrait permettre de moduler les facteurs limitants de performances physiques. En effet, certains auteurs suggèrent qu'elle permettrait d'accentuer la motivation, afin de permettre aux sportifs de puiser plus loin dans leurs efforts [11,12]. D'autres pensent que la STCC

pourrait limiter la perception de douleur lors d'activités musculaires intenses [13–16], même si cela reste controversé [17–19]. Il semblerait que la STCC pourrait aussi moduler de manière bénéfique la fatigue supra-spinale [20], ou encore repousser les limitations physiologiques protectrices mise en place par le corps (comme, notamment, pour les contractions excentriques maximales) [21].

Le but de cette revue de la littérature est donc de recenser et d'analyser les essais contrôlés randomisés portant sur les effets de la STCC sur la force musculaire ou l'endurance musculaire chez des sujets sains.

2. Matériels et méthodes

La revue systématique de la littérature suivante a suivi les recommandations pour la rédaction issues de la checklist PRISMA ((Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [22] (voir annexe 1), et le protocole a été enregistré dans le registre prospectif international des revues systématiques (PROSPERO, numéro d'enregistrement : CRD42018118053).

2.1. Recherche de la littérature

Notre recherche de la littérature a été effectuée dans les bases de données MEDLINE (via OVID) et SCOPUS. Les stratégies de recherche et les mots clés utilisés dans cette revue sont repris dans l'annexe 1.

Afin d'être le plus exhaustif possible, une inspection manuelle de la bibliographie des articles inclus et des revues

de la littérature préalablement identifiées a eu lieu. Les articles ont ensuite été exportés sur le site web de RAYYAN [23]. Le logiciel a détecté et a mis en évidence les doublons. Un tri manuel pour les supprimer a eu lieu.

Nous n'avons pas restreint nos critères d'inclusion en fonction du mode de stimulation, ni le niveau sportif des sujets, ni du mode d'aveuglement (mais les études en simple aveugle ont été mises en évidence dans le [Tableau 2](#)).

2.2. Sélection des études

Les articles ont été sélectionnés en utilisant le logiciel RAYYAN. Deux investigateurs (SB & CB) ont lu indépendamment les titres et abstracts, en sélectionnant les articles qui remplissaient initialement les critères d'inclusion. S'il y avait des divergences, une discussion entre les deux investigateurs pour inclure ou exclure l'article a aidé à prendre la décision. Si le problème n'était pas résolu, un troisième évaluateur (JLC) prenait la décision finale. Ensuite, les deux auteurs ont lu séparément les textes complets de tous les articles restants en suivant le même processus de prise de décision ([Fig. 1](#)).

Les critères d'inclusion et d'exclusion des études se trouvent dans le [Tableau 1](#).

2.3. Extraction des données

Les données ont été extraites dans un tableau structuré ([Tableau 2](#)) afin d'inclure les données suivantes : références de l'article, le type d'étude contrôlé et randomisé (cross-over ou étude parallèle), le nombre de sujets, le niveau sportif (amateur, récréationnel, confirmé, ou non spécifié), le type de stimulation, les cibles de stimulation, la durée et l'intensité de la stimulation, l'évaluation scientifiquement validée des performances physiques, la présence ou l'absence d'une amélioration significative (et si oui, l'ampleur du changement). Les éventuels effets secondaires ont aussi été extraits.

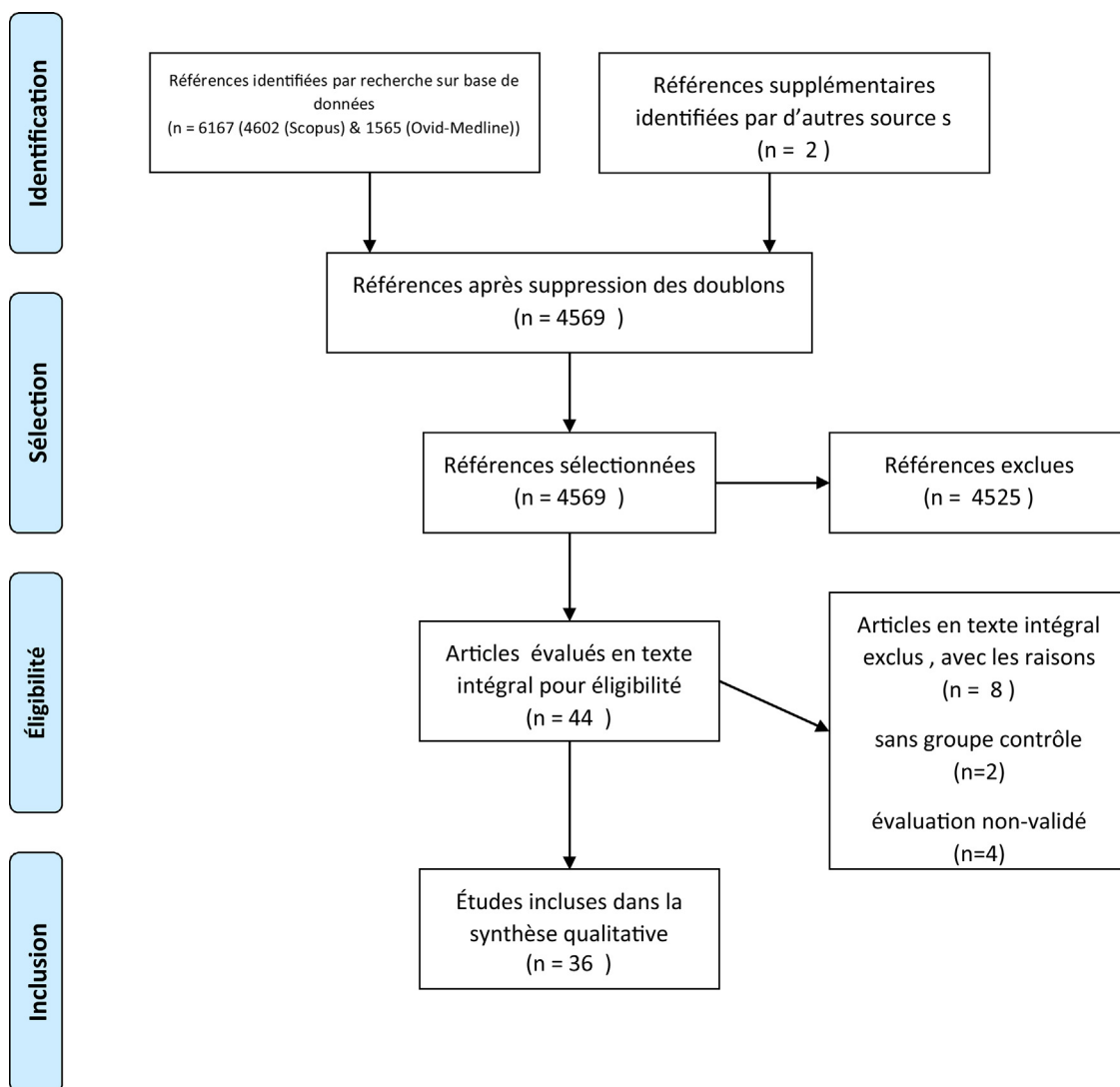


Figure 1 Organigramme de la sélection d'articles dans notre revue (PRISMA FLOW DIAGRAM).

Tableau 1 Critères d'inclusion et d'exclusion.

Inclusion	Exclusion
Articles en anglais ou en français Essai contrôlé et randomisé	Articles écrits dans une autre langue Études de cohorte, cas-contrôle, transversale, revue systématique, méta-analyses Protocole de recherche Lettre à l'éditeur, commentaire
Adultes sains, sportifs confirmés, récréationnelles, ou sédentaires Stimulation transcrânienne à courant continue	Population pathologique Enfants Autre forme de stimulation cérébrale non-invasive (par exemple : tACS, tRNS, TMS, rTMS)
Évaluation validé des performances physiques	Évaluations non-validé des performances physiques Évaluation autre que les performances physiques Pas de restriction sur la date de publication

2.4. Évaluation de la qualité

L'échelle « Physiotherapy Evidence Database Scale (PEDro) » a été utilisée pour évaluer la qualité méthodologique des articles inclus [24]. L'échelle utilise 10 questions « oui »/« non », évaluant la validité interne d'un essai clinique (le 11e élément (l'item 1) n'est pas pris en compte pour le calcul du score, donc les scores varient entre 0 et 10). Les études sont considérées comme d'excellente qualité si les notes sont égales ou supérieures à 9/10, de très bonne qualité si entre 6 et 8/10, de bonne qualité si entre 4 et 5/10 et de mauvaise qualité si inférieures ou égales à 3/10 [25]. Deux investigateurs (SB & CB) ont indépendamment lu et évalué les articles. En cas de divergence dans l'évaluation, une discussion a eu lieu pour résoudre le problème. Si le problème n'était pas résolu, un troisième investigateur (JLC) a pris la décision finale. Les données ont été extraites dans le [Tableau 3](#).

2.5. Nomenclature

Pour plus de clarté, la stimulation anodique correspond au montage où l'anode (électrode active) a été placée sur la zone du cortex moteur primaire affecté (position C3 ou C4, selon le système d'électroencéphalogramme 10/20) et la cathode (électrode de référence) a été placée dans la région supra-orbitale controlatérale (respectivement Fp2 ou FP1). La stimulation cathodique correspond au montage où la cathode (électrode active) a été placée sur la zone du cortex moteur primaire non affectée et l'anode (électrode de référence) a été placée dans la région supra-orbitale controlatérale.

3. Résultats

Notre étude comprend des données relatives aux 17 dernières années. Au total, 36 essais contrôlés randomisés, dont 12 en simple aveugle ont été inclus, totalisant 542 sujets ([Tableau 2](#)).

3.1. Identification et sélection des études

La consultation des bases de données bibliographiques nous a permis d'identifier 1565 références sur MEDLINE et 4062 références SCOPUS. Deux articles supplémentaires ont été identifiés comme potentiellement pertinents via une inspection manuelle de la bibliographie des articles et revues identifiés au préalable dans la recherche. Après que le logiciel RAYYAN ait initialement scanné les doublons, 4569 articles ont été inclus pour la sélection sur base de lecture des titres et abstracts. 44 articles répondaient à nos critères d'inclusion. Après lecture des articles complets, 8 ont été exclus pour les raisons suivantes : évaluation non validée ($n=4$), sans groupe contrôle ($n=2$) et pseudo-randomisation ($n=2$). En tout, 36 articles ont été inclus pour l'étude qualitative ([Fig. 1](#)).

3.2. Caractéristiques des études incluses

Au total, les données de 542 sujets ont été analysées. Ces sujets comprenaient 369 hommes, soit en moyenne 14,65 ($\pm 6,65$) (min 6 ; max 36) par étude. Toutes les études sauf une ont testé des sujets jeunes ($24,5 \pm 3,9$ ans). Seulement 12 articles (33,33 %) ont précisé la main dominante des sujets. La majorité d'entre eux étaient des sportifs récréationnels (16 articles) ; 8 articles ont testé des sportifs sportifs confirmés, voire de haut niveau. Un article a regardé une population variée en termes de niveau sportif. Enfin, 11 articles n'ont pas précisé le niveau de condition physique des sujets. Aucun article n'a étudié des sujets sédentaires.

D'après le [Tableau 1](#), certaines modalités de stimulation (notamment les montages) étaient très hétérogènes, variant entre de la haute définition (HD-STCC) à des études visant le cortex moteur unilatéral, le cortex moteur controlatéral (cross-éducation), et le cortex dorsolatéral préfrontal (DLPFC). Les paramètres de stimulation étaient cependant classiques. La majorité des articles étudiaient une durée de stimulation comprise entre 10 et 20 minutes (parfois 30 minutes), une intensité entre 1,5 et 2 mA, avec une séance unique de stimulation. Seuls deux articles ont testé l'effet de plusieurs séances de stimulation.

Tableau 2 Les données des études analysant les effets de la STCC sur les performances physiques [13–20,26–53].

Référence	Type d'étude (/ /ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEDro
Angius et al., 2015	X	9	R	A vs P vs Control	C3 & F4	10	2	1	Cycloergomètre TTE (70 %)	Non	7/10
Angius et al., 2018	X	12	R	Bi-Anodale vs Bi-Cathodale vs P	C3/C4 & Épaule Ipsilatérale	10	2	1	Cycloergomètre TTE (70 %) MVC (Quadriceps)	Oui (A : 13,25 ± 4,34 min ; C : 11,10 ± 4,28 min ; P : 10,76 ± 3,03 min) A > C (= P) Non	8/10
Angius et al., 2016 ^a	X	9	R	A vs A vs P vs Control	C3 & FP2 ou C3 & Épaule Droite	10	2	1	TTE (20 %) (Quadriceps) MVC (Quadriceps)	Oui (C3/Ep 219 ± 136s ; C3/FP2 : 191 ± 124s ; P : 173 ± 144s ; Contrôle : 187 ± 121s). C3/Ep > C3/FP2 (= P = Contrôle) Non	5/10
Angius et al., 2019	X	12	R	A vs P	F3 & Fp2	30	2	1	Cycloergomètre TTE (70 %)	Oui (A : 17 ± 8 min vs P : 15 ± 8 min)	8/10
Baldari et al., 2018	X	13	R	A vs C vs P	Cz & Protubérance occipitale	20	2	1	Tapis de course TTE	Non	8/10
Barwood et al., 2016	X	6	R	A vs P	T3 & FP2	20	1,5	1	Contre la montre 20 km (Cycloergomètre)	Non	7/10
		8					2		Cycloergomètre TTE (75 %)	Non	
Byrne et al., 2019 ^a	X	23	R	A vs P	F3 & FP2	20	2	1	TTE (25 %) (Quadriceps) MVC (Quadriceps)	Non	4/10
Ciccone et al., 2019 ^a	X	20	R	A vs A vs P	T3 & FP2 ou T4 & FP1	30	2	1	MVC (Quadriceps) MVC (Quadriceps) (50 répétitions à 180°/sec)	Non	4/10

Tableau 2 (Continued)

Référence	Type d'étude (//ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEdro
Cogiமானian et al., 2007 ^a	// (tDCS vs Contrôle) X (A vs C)	24	N/A	A vs C vs Control	C4 Épaule Droite	10	1,5	1	MVC (fléchisseurs coude) TTF (35 %) (Fléchisseurs du coude)	Non Oui (A : -21,1 ± 5,5 % ; C -35,7 ± 3,3 % ; Contrôle : -39,3 ± 3,3 %) A > C (= Contrôle)	5/10
Flood et al., 2017 ^a	X	12	R	A vs P	HD (1*4 A : C3/C4 non dominant & C : Cz F3/F4, T7/T8 et P3/P4	20	2	1	MVC (Quadriceps non dominant) TTE (30 %) (Quadriceps)	Non Non	7/10
Frazer et al., 2016	X	14	N/A	A vs P	C3 & Fp2	20	2	4	MVC (extenseurs poignet) MVC (fléchisseurs poignet)	Non Oui (A ↑ 8 % ; P ↑ 3 %)	9/10
Frazer et al., 2019	X	13	R	A vs P	C4 & FP1	20	2	1	MVC (fléchisseurs coude)	Non	10/10
Frazer et al., 2017	X	13	N/A	A vs P	M1 Droite FP Gauche	20	2	1	MVC (fléchisseurs coude) (cross éducation)	Oui (A : ↑ 12 % ; P : ↑ 2 %)	8/10
Hazime et al., 2017	X	8	C	A vs P	C3 & Fp2 ou C4 & FP1 (côté dominant)	20	2	1	MVC isométrique épaule (RI et RE)	Oui (RE : différence entre A et P de 0,1 (0,00 à 0,2) N/Kg pendant la stimulation 0,2 (0,1 à 0,3) N/Kg à 30 min après la stimulation, et 0,2 (0,1 à 0,3) N/Kg à 60 min après la stimulation ; RI : différence de 0,1 (0,00 à 0,2) N/Kg pendant la stimulation 0,1 (0,00 à 0,2) N/Kg à 30 min après la stimulation, et 0,1 (0,00 à 0,2) N/Kg à 60 min après la stimulation)	8/10

Tableau 2 (Continued)

Référence	Type d'étude (/ /ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEDro
Hendy & Kidgell 2013	//	30	N/A	A vs P vs Control	C3 & FP2	20	2	3*/sem pendant 3 semaines (9*)	1 RM (extenseurs poignet)	Non	7/10
Hendy & Kidgell 2014	X	10	N/A	A vs P	C4 & FP1	20	2	1	1 RM extenseurs poignet (cross éducation)	Oui (A : ↑ 5,72 % ; P : ↓ 0,41 %)	7/10
Holgado et al., 2019 ^a	X	36	C	A vs C vs P	F3 & Épaule Droite	20	2	1	Contre la montre 20 min	Non	5/10
Huang et al., 2019 ^a	X	9	R	A vs P	A : C3 & C4 & C : Cz	20	2	1	5*6 secondes sprint max sur ergocycle	Non Puissance maximale et puissance moyenne Set 1 Oui Puissance moyenne Set 2 (A : 779,8 ± 128,1 W ; P : 703,4 ± 128,5 W) Set 3 (A : 791,5 ± 127,4 W ; P : 686,9 ± 154,5 W) Set 4 (A : 783,5 ± 139,0 W ; P : 676,1 ± 147,8 W) Set 5 (A : 745,3 ± 139,1 W ; P : 596,6 ± 134,8 W)	4/10
Kan et al., 2013 ^a	X	15	N/A	A vs P	C4 & Épaule Gauche	10	2	1	MVC (fléchisseurs coude) TTE (fléchisseurs coude) (30 %)	Non	5/10
Lampropoulou & Nowicky., 2013	X	12	N/A	A vs C vs P	C3 & Épaule Gauche	10	1,5	1	MVC isométrique (fléchisseurs coude)	Non	8/10

Tableau 2 (Continued)

Référence	Type d'étude (//ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEdro
Lattari et al., 2016 ^a	X	10	R	A vs C v P	F3 & FP2	20	2	1	Nombre de répétitions à 10 RM (flexion coude)	Oui (A : moyenne = 11,1, minimum = 10,8, et maximum = 11,4) vs C : (moyenne = 9,6, minimum = 9,3, et maximum = 9,8 & P : (moyenne = 10,1, minimum = 9,9, et maximum = 10,2) A > C (=P)	5/10
Lattari et al., 2020 (a)	X	10	C	A vs C vs P	Cz & FP2	20	2	1	CMJ	Oui (hauteur A : ↑ 3,9 cm, C : ↓ 2,04 cm, P : ↑ 0,31 cm ; Temps de vol : A : ↑ 27,9 ms, C : ↓ 16ms, P : ↓ 26,7 ms ; Puissance maximale : A : ↑ 237,33 W, C : ↓ 124,01, P : ↓ 102,52 W) A > C (=P)	8/10
Lattari et al., 2020 (b)	X	15	C	A vs C vs P	F3 & FP2	20	2	1	Charge de travail (Extension de jambes) à 10 RM	Oui A : 2340,2 ± 487,9 Kg, C : 1519,4 ± 335,0, P : 1541,8 ± 287,6 A > C (=P)	7/10
Lattari et al., 2019	X	15	R	A vs P	F3 & FP2	20	2	1	Charge de travail (Extension de jambes) à 10 RM	Oui (A : 800,7 ± 139,3 kg ; P : 661,2 ± 112,6 kg)	5/10
Maeda et al., 2017	//	24	N/A	A vs P	C3 ou C4 (non dominant) & épaule ipsilatérale	10	2	Tous les 3 jours pendant 3 semaines (7*)	MVC (extenseurs et fléchisseurs genoux)	Non	8/10

Tableau 2 (Continued)

Référence	Type d'étude (/ /ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEDro
Montenegro et al., 2015	X	14	R	A vs P	C3 & FP2	20	2	1	MVC (3 séries de 10 répétitions à 60°/sec) (fléchisseurs et extenseurs genou)	Non	7/10
Muthalib et al., 2013 ^a	X	15	N/A	A vs P	C4 & Épaule Droite	10	2	1	TTE (30 %) (fléchisseurs du coude)	Non	4/10
Okano et al., 2015	X	10	C	A vs P	T3 & FP2	20	2	1	Test incrémental maximal ergocycle (puissance maximale)	Oui (A : 313,2 ± 29,9 W ; P : 301 ± 19,8 W)	7/10
Oki et al., 2016	X	13	N/A	A vs P	M1 (côté non spécifié) FP2	Jusqu'à fin de l'effort (max 20 min)	1,5	1	TTE (20 %) (isométrique fléchisseurs coude)	Oui A : 16,9 ± 2,2 min ; P : 14,7 ± 1,8 min)	7/10
Park et al., 2019 ^a	X	10	C	A vs P	A : Cz C : C5 & 6	20	1,98	1	TTE (course à pied 80 % VO2max)	Oui (A : 21,18 ± 7,13 min ; P : 18,44 ± 6,32 min)	4/10
Radel et al., 2017	X	22	N/A	A vs A vs P	HD (4*1 A : AF4 ou C2, C : 40 mm autour de l'anode)	10 + durée de l'épreuve (max 20 min)	2	1	TTE (35 %) (fléchisseurs coude)	No	9/10
Sales et al., 2016	X	19	R	A vs P	T3 & FP2	20	2	1	MVC extension jambe (5* 60°/sec & 5* 180°/sec)	Non Force maximale Oui Travail total (A : 1132,9 ± 207,0 J vs P = 1015,43 ± 159,2 J ; à 60°/s ; A : 823,7 ± 135,5 J vs P : 746,3 ± 105,0 J ; à 180°/s)	7/10

Tableau 2 (Continued)

Référence	Type d'étude (// ou X)	n	Niveau sportif	Type de stimulation (A/B/C/E)	Cible des stimulations	Durée de Stim (min)	Intensité (mA)	Nombre de sessions	Évaluation	Amélioration	PEDro
Valenzuela et al., 2018 ^b	X	8	C	A vs P	C3 & FP2	20	2	1	800 m natation	Non	8/10
Vargas et al., 2017	X	20	C	A vs P	C3 ou C4 (côté dominant) & FP controlatéral	20	2	1	MVC isométrique (extenseurs genoux)	Oui Après stimulation différence entre A et P de 0,4 (0,1 à 0,8 N/Kg) après 30 min différence de 0,9 (0,4 à 1,4 N/Kg) et après 60 min différence de 1,0 (0,6 à 1,6 N/Kg)	9/10
Vitor-Costa et al., 2015 ^a	X	11	R	A vs C vs P	Cz (couvrir M1 bilatéralement) & Protubérance occipitale	13	2	1	TTE (80 %) (ergocycle)	Oui (A : 491 ± 100 sec ; C : 443 ± 11 sec ; P : 407 ± 69 sec) A > C (=P)	6/10
Williams et al., 2013	X	18	V	A vs P	C4 & FP1	Jusqu'à 20 min	1,5	1	TTE (20 %) (fléchisseurs coude)	Oui (Groupe ayant reçu 20 min de stimulation : A : 16,48 ± 2,87 min vs. P : 13,13 ± 1,34 min) Non (Groupe ayant < 20 min de stimulation)	8/10

X : Crossover ; // : parallèle ; S : Sédentaire ; R : Récréationnelle ; C : Confirmés ; V : Variable ; N/A : Sans information.

^a Étude en simple aveugle.

^b Auteur contacté pour information par rapport à la randomisation.

Tableau 3 Effets des montages sur les performances.

Montage	Nombre de références	Évaluation	Nombre d'articles avec des effets positives
« Cortex moteur/cortex frontal »	14	6 Endurance 9 Force	3 Oui 3 Non 6 Oui 3 Non
« Cortex moteur/épaule »	6	4 Endurance 5 Force	2 Oui 2 Non 0 Oui 5 Non
« Cortex temporal/cortex frontal »	4	2 Endurance 2 Force	1 Oui 1 Non 1 Oui 1 Non
« Cortex frontal/cortex frontal »	5	5 Endurance 1 Force	4 Oui 1 Non 0 Oui 1 Non

3.3. Effets de la STCC sur les performances physiques

3.3.1. Évaluations

Les évaluations étaient principalement divisées en deux catégories : l'évaluation de la force maximale (MVC) et de l'endurance (cycloergocycle ou temps maximal d'une contraction soutenue (TTE)). Ici encore, une large hétérogénéité dans les évaluations est apparue. Les TTE ont été réalisées à diverses intensités (entre 20 et 70 % de la force maximale), de diverses manières (contraction analytique, cycloergocycle, tapis de course à pied, ...). Les MVC ont été réalisées sur une seule contraction, ou sur une série de contractions, à différentes vitesses (de 60°/sec à 180°/sec).

3.4. Effets moteurs

Malgré une grande hétérogénéité dans les populations, les paramètres de stimulation et les évaluations, la STCC semble avoir une fonction positive tant sur l'endurance que sur la force maximale. 13 des 23 articles évaluant les effets de la STCC sur l'endurance montrent un effet positif. D'une manière semblable, 8 des 19 articles évaluant les effets de la STCC sur la force montrent un effet positif. Un seul article [50] a regardé la persistance de l'effet de la STCC post-stimulation et a trouvé des effets perdurant jusqu'à 30 à 60 minutes après. Une analyse approfondie des articles ont montré que 4 montages principales ont été utilisés : un montage « cortex moteur/cortex frontal » (14 utilisations), un montage « cortex moteur/épaule » (6 utilisations), un montage « cortex temporal/cortex frontal » (4 utilisations) et un montage « cortex frontal/cortex frontal » (5 utilisations) (Tableau 3).

3.5. Effets secondaires

Seulement 12 articles mentionnent une évaluation des effets non désirés de la STCC. Deux ont précisément décrit ces effets secondaires, 5 mentionnent qu'il n'y a eu aucun effet indésirable. Les effets les plus souvent mentionnés concernent une sensation de « picotement », d'« irritation » ou une « sensation de brûlure ».

3.6. Évaluation de la qualité des études incluses

La qualité globale des études évaluée avec l'outil PEDro était bonne. Le score moyen des articles analysés était de 6,78/10 ($\pm 1,71$) et était compris entre 4 et 10/10 (Fig. 2). Les faiblesses méthodologiques les plus rencontrées concernent le mode d'aveuglement des sujets, des thérapeutes et des évaluateurs.

4. Discussion

La présente étude a eu comme objectif d'analyser et de synthétiser les données les plus récentes de la littérature portant sur les effets de la STCC sur les performances physiques. Un résumé préliminaire est que la littérature est très homogène en termes des paramètres de stimulation (durée (entre 20 à 30 min), intensité (entre 1 et 2 mA)), mais extrêmement variée en termes de cible de stimulation, et de paramètres étudiés. Les effets de la stimulation sont donc logiquement extrêmement variables : certaines études ne trouvant aucun effet, d'autres des effets hautement significatifs avec une ampleur d'action très élevée.

En ce qui concerne la qualité des études, il était surprenant de voir le nombre réalisé en simple aveugle. La STCC semble être un outil efficace pour garder les sujets aveugles [54], et même si certains appareils ne sont pas conçus pour avoir un mode double aveugle, l'ajout d'un expérimentateur externe pour programmer la machine aurait pu significativement augmenter la qualité des études. De même, la taille d'échantillonnage dans les études est petite. Par rapport aux études basées sur les améliorations motrices de la STCC sur des victimes d'AVC [4], le nombre de sujets par article reste faible. Cependant, la majorité des articles sur des sujets sains/sportifs sont en cross-over, ce qui améliore la qualité de l'étude.

Un élément essentiel manquant dans deux tiers des articles était la prise en compte de la dominance du membre supérieur ; en observant les techniques de neuromodulation du cerveau, il existe des asymétries corticales et sous-corticales entre gauchers et droitiers [55].

Le niveau sportif est un autre élément important à prendre en compte. 25 des 36 auteurs l'ont d'ailleurs précisé. Dans le cadre de données personnelles en cour de publication, nous évoquons des réponses différentes sur le plan des performances physiques entre des sujets

	Répartition aléatoire	Allocation masquée	Groupes similaires au départ	Aveuglement de tous les sujets	Aveuglement de tous les thérapeutes	Aveuglement de tous les évaluateurs	Résultats mesurés chez 85% des sujets	Tous les sujets ont reçu un traitement	Comparaisons statistiques entre les groupes rapportées	Mesures ponctuelles et mesures de variabilité	Score totale /10
Angius et al., 2015	+	?	?	+	?	?	+	+	+	+	7
Angius et al., 2018	+	?	+	+	?	?	+	+	+	+	8
Angius et al., 2016†	+	?	+	+	-	-	?	?	+	+	5
Angius et al., 2019	+	?	+	+	?	?	+	+	+	+	8
Baldari et al., 2018	+	?	+	+	+	-	+	+	+	+	8
Barwood et al., 2016	+	+	?	+	+	+	?	?	+	+	7
Byrne et al., 2019†	+	?	?	+	-	-	?	?	+	+	4
Ciccone et al., 2019†	+	?	?	+	-	-	?	?	+	+	4
Cogiamanian et al., 2007†	+	?	+	+	-	-	?	?	+	+	5
Flood et al., 2017†	+	?	+	+	-	-	+	+	+	+	7
Frazer et al., 2016	+	+	+	+	+	+	+	?	+	+	9
Frazer et al., 2019	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10
Frazer et al., 2017	+	+	+	+	+	+	?	?	+	+	8
Hazime et al., 2017	+	+	+	+	+	+	?	?	+	+	8
Hendy & Kidgell 2013	+	?	+	+	+	+	?	?	+	+	7
Hendy & Kidgell 2014	+	?	+	+	+	+	?	?	+	+	7
Holgado et al., 2019†	+	?	+	+	-	-	?	?	+	+	5
Huang et al., 2019†	+	?	?	+	-	-	?	?	+	+	4
Kan et al., 2013†	+	?	+	+	-	-	?	?	+	+	5
Lampropoulou & Nowicky, 2013	+	?	+	+	+	+	-	+	+	+	8
Lattari et al., 2016†	+	?	?	+	-	+	?	?	+	+	5
Lattari et al., 2020 (a)	+	?	+	+	-	+	+	+	+	+	8
Lattari et al., 2020 (b)	+	?	?	+	?	?	+	+	+	+	7
Lattari et al., 2019	+	?	?	+	-	+	?	?	+	+	5
Maeda et al., 2017	+	?	+	+	?	?	+	+	+	+	8
Montenegro et al., 2015	+	?	?	+	-	+	+	+	+	+	7
Muthalib et al., 2013†	+	?	+	+	-	-	?	?	-	+	4
Okano et al., 2015	+	?	?	+	-	+	+	+	+	+	7
Okí et al., 2016	+	?	+	+	+	+	?	?	+	+	7
Park et al., 2019†	+	?	?	+	-	-	?	?	+	+	4
Radel et al., 2017	+	+	?	+	+	+	+	+	+	+	9
Sales et al. 2016	+	?	?	+	-	+	+	+	+	+	7
Valenzuela et al., 2018†	+	?	+	+	+	+	+	+	+	+	9
Vargas et al., 2017	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	9
Vitor-Costa et al., 2015†	+	?	?	+	-	-	+	+	+	+	6
Williams et al., 2013	+	?	+	+	-	+	+	+	+	+	8



Figure 2 Score de PEDro.

sportifs confirmés, récréationnels [56] et sédentaires [21]. Les améliorations chez les sujets sportifs confirmés étaient négligeables comparativement aux sujets sportifs récréationnels et sédentaires. Étonnamment, dans cette revue, nous avons retrouvé, de façon ponctuelle, des articles montrant des améliorations significatives et importantes après une seule séance de stimulation chez des sujets sportifs confirmés voire de haut niveau (un article a trouvé une amélioration de 35 % en moyenne par rapport au placebo [44]). Ce résultat est surprenant car les sujets avaient au préalable un niveau avancé en entraînement de la force.

Le choix des cibles de stimulation, malgré la grande diversité, garde un certain sens. En effet, dans les articles utilisant les montages « cortex moteur/cortex frontal », 6 articles sur 9 montrent un effet positif de ce montage sur la force maximale. La stimulation du cortex moteur semble évidente pour pouvoir améliorer les performances physiques, et ces effets ont déjà été validés par EMG en 2004 [57]. En revanche 3 articles sur 6 montrent un effet positif de ce montage sur l'endurance. Les montages « cortex frontal/cortex frontal » ont beaucoup plus de succès sur ce paramètre (4 articles sur 5 montrant un effet positif de ce montage sur l'endurance). La stimulation du cortex frontal pourrait d'une part atténuer la douleur et la perception de celle-ci [58], et permettrait d'accroître la motivation, afin de permettre aux sportifs de puiser plus loin dans leurs efforts [11,12]. Les montages « cortex temporal/cortex frontal » et « cortex moteur/épaule » restent cependant controversés.

Il semblerait que cette technique pourrait présenter quelques avantages pour l'amélioration des performances physiques. Sur les 36 articles qui évaluent l'endurance, 12 des 23 montrent un effet positif de la STCC et, 8 des 23 articles montrent un effet positif de la STCC sur la force. Cependant, ces effets immédiats d'une séance unique de STCC n'ont pas une durée de vie suffisamment longue pour qu'il s'agisse d'un avantage lors de la compétition (habituellement entre quelques minutes à une heure) [57,59–68]. Des études ont trouvé que plusieurs sessions consécutives de STCC peuvent avoir un effet cumulatif qui permet aux bénéficiaires de durer plus longtemps (jusqu'à 3 mois post-stimulation [69,70]).

De manière similaire à la revue systématique de Brunoni [71], il semble y avoir un manque d'évaluation et de signalement des effets indésirables de la STCC dans la littérature. Seules 12 des 36 études ont mentionné l'observation ou l'évaluation des effets indésirables, et plus précisément, 5 n'ont mentionné aucun effet indésirable. Ceci reste étonnant, sachant que la majorité des protocoles utilisaient une intensité à 2 mA, et à cette intensité, l'efficacité de l'aveuglement reste discutable, car il y a une perception des effets indésirables [72,73].

En pratique, il existe des appareils « grand public », tel que le Halo Sport®, qui sont déjà utilisés par des sportifs, amateurs et confirmés [74]. Le prix abordable et la facilité d'utilisation (connexion Bluetooth avec un smartphone, absence de gel conducteur ou de liquide physiologique pour une bonne conduction et réglages faciles) rendent ce genre d'appareil attractif. Un faible nombre d'articles (deux) avec une très petite population (respectivement 9 et 10 sujets) ont étudié l'utilité de cet appareil dans le sport, et rapportent une amélioration des performances physiques

[17,39]. Cependant, il faut reconnaître la principale limite de ce modèle : il ne peut stimuler que les zones motrices (alors que la stimulation du cortex frontal ou dorsolatéral préfrontal a fait énormément de preuves quant à ses effets sur la perception de la douleur) [58].

Certains auteurs ont exploré la question de la STCC dans le dopage. À la date de la rédaction de cet article, l'Agence Mondiale Antidopage (AMA) ne considère pas la STCC, ni aucune forme de stimulation électrique transcrânienne comme du dopage. Bien qu'ils conviennent que la STCC améliore les performances physiques et mentales [75], il n'est pas considéré comme un agent dopant car il permet simplement une utilisation plus optimale des qualités intrinsèques des athlètes, mais ne les augmente pas [76]. Les effets à court terme auraient un effet limité sur les compétitions, car la durée des procédures avant l'exécution réelle est généralement supérieure à 45 minutes. Certains auteurs considèrent donc qu'il ne s'agit pas d'une technique de dopage [77], d'autres le considèrent comme, mais au vu de l'absence des effets néfastes, la question de l'autorisation de l'utilisation de cette technique dans le sport devient plutôt une question éthique de « fair-play » [78].

4.1. Limitations

Nous avons consulté deux bases de données et analysé les bibliographies des articles retenus, ainsi que des revues systématiques qui ont été retrouvées. Cependant, la consultation d'une troisième base de données aurait potentiellement pu nous permettre d'être encore plus complets. La faible qualité de certaines études (simple aveugle, population faible), ainsi que l'énorme variabilité des cibles de stimulation et méthodes d'évaluation pourraient aussi influencer l'interprétation des résultats.

5. Conclusion

Malgré des protocoles très variés, la STCC semble avoir des effets significatifs et intéressants sur les performances physiques à court terme. Il semble avoir des effets si les séances de STCC se font de manière régulière, pendant 10 à 20 minutes avec une intensité entre 1 et 2 mA et en sélectionnant correctement le montage pour l'effet souhaité :

- « cortex moteur/cortex frontal » pour améliorer la force maximale ;
- « cortex frontal/cortex frontal » pour traiter la douleur et la perception de la douleur, ainsi que pour influencer la motivation du sujet.

Actuellement, la STCC n'est pas encore considérée comme technique de dopage selon l'AMA. Qu'il s'agisse de la force ou de l'endurance, la STCC semble être un adjuvant prometteur pour accompagner l'entraînement. Cependant, la réalisation de travaux complémentaires contribuera à mieux préciser les bénéfices escomptés.

Déclaration de liens d'intérêts

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

Annexe 1. Stratégies de recherche

Les bases de données ont été consultées le 10/01/2020.

Stratégie de recherche MEDLINE (via OVID)

(Transcranial Direct Current Stimulation/ OR tdcS.ti,ab,kf. OR (transcranial adj4 stimulation*).ti,ab,kf.) AND (Randomized Controlled Trials as Topic/ OR Controlled Clinical Trials as Topic/ OR "Randomized controlled trial*".ti,ab,kf. OR "Randomized clinical trial*".ti,ab,kf. OR "controlled clinical trial*".ti,ab,kf. OR Placebo-controlled.ti,ab,kf. OR Sham-controlled.ti,ab,kf. OR "Randomized double-blind*".ti,ab,kf. OR (Random* adj2 allocat*).ti,ab,kf. OR RCT.ti,ab,kf.).

Stratégie de recherche SCOPUS

((TITLE-ABS-KEY ("transcranial direct current stimulation")) OR (TITLE-ABS-KEY (tdcs)) OR (TITLE-ABS-KEY (transcranial W/4 stimulation))) AND ((TITLE-ABS-KEY (rct)) OR ((TITLE-ABS-KEY ("random* controlled trial")) OR (TITLE-ABS-KEY ("random* clinical trial")) OR (TITLE-ABS-KEY ("controlled clinical trial")) OR (TITLE-ABS-KEY ("placebo-controlled")) OR (TITLE-ABS-KEY ("sham-controlled")) OR (TITLE-ABS-KEY ("random* double-blind")) OR (TITLE-ABS-KEY (placebo)))).

Références

- [1] Gabriel BM, Zierath JR. The limits of exercise physiology: from performance to health. *Cell Metab* 2017;25:1000–11.
- [2] Schiphof-Godart L, Roelands B, Hettinga FJ. Drive in sports: how mental fatigue affects endurance performance. *Front Psychol* 2018;9:1383.
- [3] Nitsche MA, Cohen LG, Wassermann EM, Priori A, Lang N, Antal A, et al. Transcranial direct current stimulation: state of the art 2008. *Brain Stimul* 2008;1:206–23.
- [4] Bornheim S, Thibaut A, Beaudart C, Maquet P, Croisier J, Kaux J. Evaluating the effects of tDCS in stroke patients using functional outcomes: a systematic review. *Submitt Publ* 2020.
- [5] Broeder S, Nackaerts E, Heremans E, Vervoort G, Meesen R, Verheyden G, et al. Transcranial direct current stimulation in Parkinson's disease: Neurophysiological mechanisms and behavioral effects. *Neurosci Biobehav Rev* 2015;57:105–17.
- [6] Shiozawa P, Fregni F, Benseñor IM, Lotufo PA, Berlím MT, Daskalakis JZ, et al. Transcranial direct current stimulation for major depression: an updated systematic review and meta-analysis. *Int J Neuropsychopharmacol* 2014;17:1443–52.
- [7] Nitsche MA, Seeber A, Frommann K, Klein CC, Rochford C, Nitsche MS, et al. Modulating parameters of excitability during and after transcranial direct current stimulation of the human motor cortex. *J Physiol* 2005;568:291–303.
- [8] Lang N, Siebner HR, Ward NS, Lee L, Nitsche MA, Paulus W, et al. How does transcranial DC stimulation of the primary motor cortex alter regional neuronal activity in the human brain? *Eur J Neurosci* 2005;22:495–504.
- [9] Baxter BS, Edelman BJ, Sohrabpour A, He B. Anodal transcranial direct current stimulation increases bilateral directed brain connectivity during motor-imagery based brain-computer interface control. *Front Neurosci* 2017;11:691.
- [10] Buch ER, Santarnecchi E, Antal A, Born J, Celnik PA, Classen J, et al. Effects of tDCS on motor learning and memory formation: a consensus and critical position paper. *Clin Neurophysiol* 2017;128:589–603.
- [11] Ohmann HA, Kuper N, Wacker J. Left frontal anodal tDCS increases approach motivation depending on reward attributes. *Neuropsychologia* 2018;119:417–23.
- [12] Soutschek A, Kang P, Ruff CC, Hare TA, Tobler PN. Brain stimulation over the frontopolar cortex enhances motivation to exert effort for reward. *Biol Psychiatry* 2018;84:38–45.
- [13] Angius L, Mauger AR, Hopker J, Pascual-Leone A, Santarnecchi E, Marcora SM. Bilateral extracephalic transcranial direct current stimulation improves endurance performance in healthy individuals. *Brain Stimul* 2018;11:108–17.
- [14] Angius L, Pageaux B, Hopker J, Marcora SM, Mauger AR. Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors. *Neuroscience* 2016;339:363–75.
- [15] Lattari E, Vieira LAF, Oliveira BRR, Unal G, Bikson M, de Mello Pedreiro RC, et al. Effects of transcranial direct current stimulation with caffeine intake on muscular strength and perceived exertion. *J Strength Cond Res* 2019;33:1237–43.
- [16] Oki K, Mahato NK, Nakazawa M, Amano S, France CR, Russ DW, et al. Preliminary evidence that excitatory transcranial direct current stimulation extends time to task failure of a sustained, submaximal muscular contraction in older adults. *J Gerontol Ser A Biol Sci Med Sci* 2016;71:1109–12.
- [17] Park SB, Jun Sung D, Kim B, Kim SJ, Han JK. Transcranial direct current stimulation of motor cortex enhances running performance. *PLoS One* 2019;14, e0211902.
- [18] Radel R, Tempest G, Denis G, Besson P, Zory R. Extending the limits of force endurance: stimulation of the motor or the frontal cortex? *Cortex* 2017;97:96–108.
- [19] Valenzuela PL, Amo C, Sánchez-Martínez G, Torrontegi E, Vázquez-Carrión J, Montalvo Z, et al. Enhancement of mood but not performance in elite athletes with transcranial direct-current stimulation. *Int J Sports Physiol Perform* 2019;14:310–6.
- [20] Williams PS, Hoffman RL, Clark BC. Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction. *PLoS One* 2013;8:e81418.
- [21] Bornheim S, Kaux J-F, Crielaard J-M, Thibaut A, Maquet P, Croisier J-L. tDCS: a new means of muscle performance improvements (a randomized, double blind, controlled trial). *Submitt Publ* 2020.
- [22] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, Altman D, Antes G, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Med* 2009;6:e1000097.
- [23] Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Syst Rev* 2016;5.
- [24] Maher CG, Sherrington C, Herbert RD, Moseley AM, Elkins M. Reliability of the PEDro Scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys Ther* 2003;83:713–21.
- [25] Foley NC, Teasell RW, Bhogal SK, Speechley MR. Stroke rehabilitation evidence-based review: methodology. *Top Stroke Rehabil* 2003;10:1–7.
- [26] Baldari C, Buzzachera CF, Vitor-Costa M, Gabardo JM, Bernardes AG, Altimari LR, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on psychophysiological responses to maximal incremental exercise test in recreational endurance runners. *Front Psychol* 2018;9.
- [27] Barwood MJ, Butterworth J, Goodall S, House JR, Laws R, Nowicky A, et al. The effects of direct current stimulation on exercise performance, pacing and perception in temperate and hot environments. *Brain Stimul* 2016;9:842–9.
- [28] Byrne R, Flood A. The influence of transcranial direct current stimulation on pain affect and endurance exercise. *Psychol Sport Exerc* 2019:45.

- [29] Ciccone AB, Deckert JA, Schlabs CR, Tilden MJ, Herda TJ, Galagher PM, et al. Transcranial direct current stimulation of the temporal lobe does not affect high-intensity work capacity. *J Strength Cond Res* 2019;33:2074–86.
- [30] Cogiamanian F, Marceglia S, Ardolino G, Barbieri S, Priori A. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas. *Eur J Neurosci* 2007;26:242–9.
- [31] Flood A, Waddington G, Keegan RJ, Thompson KG, Cathcart S. The effects of elevated pain inhibition on endurance exercise performance. *Peer J* 2017;2017.
- [32] Frazer A, Williams J, Spittles M, Rantalainen T, Kidgell D. Anodal transcranial direct current stimulation of the motor cortex increases cortical voluntary activation and neural plasticity. *Muscle Nerve* 2016;54:903–13.
- [33] Frazer AK, Howatson G, Ahtiainen JP, Avela J, Rantalainen T, Kidgell DJ. Priming the motor cortex with anodal transcranial direct current stimulation affects the acute inhibitory corticospinal responses to strength training. *J Strength Cond Res* 2019;33:307–17.
- [34] Frazer AK, Williams J, Spittle M, Kidgell DJ. Cross-education of muscular strength is facilitated by homeostatic plasticity. *Eur J Appl Physiol* 2017;117:665–77.
- [35] Hazime FA, da Cunha RA, Solieman RR, Romancini ACB, Pochini A, de C, et al. Anodal Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) increases isometric strength of shoulder rotators muscles in handball players. *Int J Sports Phys Ther* 2017;12:402–7.
- [36] Hendy AM, Kidgell DJ. Anodal tDCS applied during strength training enhances motor cortical plasticity. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45:1721–9.
- [37] Hendy AM, Kidgell DJ. Anodal-tDCS applied during unilateral strength training increases strength and corticospinal excitability in the untrained homologous muscle. *Exp Brain Res* 2014;232:3243–52.
- [38] Holgado D, Zandonai T, Ciria LF, Zabala M, Hopker J, Sanabria D. Transcranial direct current stimulation (tDCS) over the left prefrontal cortex does not affect time-trial self-paced cycling performance: Evidence from oscillatory brain activity and power output. *PLoS One* 2019;14:e0210873.
- [39] Huang L, Deng Y, Zheng X, Liu Y. Transcranial direct current stimulation with halo sport enhances repeated sprint cycling and cognitive performance. *Front Physiol* 2019;10.
- [40] Kan B, Dundas JE, Nosaka K. Effect of transcranial direct current stimulation on elbow flexor maximal voluntary isometric strength and endurance. *Appl Physiol Nutr Metab* 2013;38:734–9.
- [41] Lampropoulou SI, Nowicky AV. The effect of transcranial direct current stimulation on perception of effort in an isolated isometric elbow flexion task. *Motor Control* 2013;17:412–26.
- [42] Lattari E, Andrade ML, Filho AS, Moura AM, Neto GM, Silva JG, et al. Can transcranial direct current stimulation improve the resistance strength and decrease the rating perceived scale in recreational weight-training experience? *J Strength Cond Res* 2016;30:3381–7.
- [43] Lattari E, Campos C, Lamego MK, Legey S, Neto GM, Rocha NB, et al. Can transcranial direct current stimulation improve muscle power in individuals with advanced weight-training experience? *J Strength Cond Res* 2020;34:97–103.
- [44] Lattari E, Rosa Filho BJ, Fonseca Junior SJ, Murillo-Rodriguez E, Rocha N, Machado S, et al. Effects on volume load and ratings of perceived exertion in individuals' advanced weight training after transcranial direct current stimulation. *J Strength Cond Res* 2020;34:89–96.
- [45] Maeda K, Yamaguchi T, Tatemoto T, Kondo K, Otaka Y, Tanaka S. Transcranial direct current stimulation does not affect lower extremity muscle strength training in healthy individuals: a triple-blind, sham-controlled study. *Front Neurosci* 2017;11:179.
- [46] Montenegro R, Okano A, Gurgel J, Porto F, Cunha F, Mas-saferri R, et al. Motor cortex tDCS does not improve strength performance in healthy subjects. *Mot Rev Educ Física* 2015;21:185–93.
- [47] Muthalib M, Kan B, Nosaka K, Perrey S. Effects of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on prefrontal cortex activation during a neuromuscular fatigue task: an fNIRS study. *Adv Exp Med Biol* 2013;789:73–9 [Springer New York LLC].
- [48] Okano AH, Fontes EB, Montenegro RA, De Tarso Veras Fari-natti P, Cyrino ES, Li LM, et al. Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise. *Br J Sports Med* 2015;49:1213–8.
- [49] Magalhães Sales M, De Sousa CV, Vieira Browne RA, Bodnariuc Fontes E, Dos Reis Vieira Olher R, Ernesto C, et al. Transcranial direct current stimulation improves muscle isokinetic performance of young trained individuals [La stimolazione transcranica a corrente diretta migliora la prestazione muscolare isocinetica negli individui giovani e allenati]. *Med Dello Sport* 2016;69:1–2.
- [50] Vargas VZ, Baptista AF, Pereira GOC, Pochini AC, Ejnisman B, Santos MB, et al. Modulation of isometric quadriceps strength in soccer players with transcranial direct current stimulation: a crossover study. *J Strength Cond Res* 2018;32:1336–41.
- [51] Vitor-Costa M, Okuno NM, Bortolotti H, Bertollo M, Boggio PS, Fregni F, et al. Improving cycling performance: transcranial direct current stimulation increases time to exhaustion in cycling. *PLoS One* 2015;10.
- [52] Angius L, Hopker JG, Marcora SM, Mauger AR. The effect of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on exercise-induced pain. *Eur J Appl Physiol* 2015;115:2311–9.
- [53] Angius L, Santarnecchi E, Pascual-Leone A, Marcora SM. Transcranial direct current stimulation over the left dor-solateral prefrontal cortex improves inhibitory control and endurance performance in healthy individuals. *Neuroscience* 2019;419:34–45.
- [54] Gandiga PC, Hummel FC, Cohen LG. Transcranial DC stimulation (tDCS): a tool for double-blind sham-controlled clinical studies in brain stimulation. *Clin Neurophysiol* 2006;117:845–50.
- [55] Toga AW, Thompson PM. Mapping brain asymmetry. *Nat Rev Neurosci* 2003;4:37–48.
- [56] Bornheim S, Paulus J, Kaux J-F, Croisier J-L. Comparing the effects of tDCS on endurance parameters between high level and recreational athletes. *Unpubl Data* 2020.
- [57] Lang N, Nitsche MA, Paulus W, Rothwell JC, Lemon RN. Effects of transcranial direct current stimulation over the human motor cortex on corticospinal and transcallosal excitability. *Exp Brain Res* 2004;156:439–43.
- [58] Lefaucheur JP, Antal A, Ahdab R, Ciampi de Andrade D, Fregni F, Khedr EM, et al. The use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) and transcranial direct current stimulation (tDCS) to relieve pain. *Brain Stimul* 2008;1:337–44.
- [59] Ardolino G, Bossi B, Barbieri S, Priori A. Non-synaptic mechanisms underlie the after-effects of cathodal transcutaneous direct current stimulation of the human brain. *J Physiol* 2005;568:653–63.
- [60] Tanaka S, Takeda K, Otaka Y, Kita K, Osu R, Honda M, et al. Single session of transcranial direct current stimulation transiently increases knee extensor force in patients with hemiparetic stroke. *Neurorehabil Neural Repair* 2011;25:565–9.
- [61] Boros K, Poreisz C, Münchau A, Paulus W, Nitsche MA. Pre-motor transcranial direct current stimulation (tDCS) affects

- primary motor excitability in humans. *Eur J Neurosci* 2008;27:1292–300.
- [62] Furubayashi T, Terao Y, Arai N, Okabe S, Mochizuki H, Hanajima R, et al. Short and long duration transcranial direct current stimulation (tDCS) over the human hand motor area. *Exp Brain Res* 2008;185:279–86.
- [63] Galea JM, Celnik P. Brain polarization enhances the formation and retention of motor memories. *J Neurophysiol* 2009;102:294–301.
- [64] Hummel FC, Cohen LG. Improvement of motor function with noninvasive cortical stimulation in a patient with chronic stroke. *Neurorehabil Neural Repair* 2005;19:14–9.
- [65] Hummel FC, Heise K, Celnik P, Floel A, Gerloff C, Cohen LG. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex. *Neurobiol Aging* 2010;31:2160–8.
- [66] Jeffery DT, Norton JA, Roy FD, Gorassini MA. Effects of transcranial direct current stimulation on the excitability of the leg motor cortex. *Exp Brain Res* 2007;182:281–7.
- [67] Nitsche M, Paulus W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *J Physiol* 2000;527 Pt 3:633–9.
- [68] Tanaka S, Hanakawa T, Honda M, Watanabe K. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation. *Exp Brain Res* 2009;196:459–65.
- [69] Reis J, Schambra HM, Cohen LG, Buch ER, Fritsch B, Zarahn E, et al. Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation. *Proc Natl Acad Sci* 2009;106:1590–5.
- [70] Tanaka S, Sandrini M, Cohen LG. Modulation of motor learning and memory formation by non-invasive cortical stimulation of the primary motor cortex. *Neuropsychol Rehabil* 2011;21:650–75.
- [71] Brunoni AR, Amadera J, Berbel B, Volz MS, Rizzerio BG, Fregni F. A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. *Int J Neuropsychopharmacol* 2011;14:1133–45.
- [72] O’Connell NE, Cossar J, Marston L, Wand BM, Bunce D, Moseley GL, et al. Rethinking clinical trials of transcranial direct current stimulation: participant and assessor blinding is inadequate at intensities of 2mA. *PLoS One* 2012;7.
- [73] Wallace D, Cooper NR, Paulmann S, Fitzgerald PB, Russo R. Perceived comfort and blinding efficacy in randomised sham-controlled transcranial direct current stimulation (tDCS) trials at 2 mA in young and older healthy adults. *PLoS One* 2016;11.
- [74] Edwards DJ, Cortes M, Wortman-Jutt S, Putrino D, Bikson M, Thickbroom G, et al. Transcranial direct current stimulation and sports performance. *Front Hum Neurosci* 2017;11:243.
- [75] Colzato LS, Nitsche MA, Kibele A. Noninvasive brain stimulation and neural entrainment enhance athletic performance—a Review. *J Cogn Enhanc* 2016;1–7.
- [76] Davis NJ. Neurodoping: brain stimulation as a performance-enhancing measure. *Sport Med* 2013;43:649–53.
- [77] Holgado D, Vadiello MA, Sanabria D. “Brain-Doping” Is It a Real Threat? *Front Physiol* 2019;10:483.
- [78] Zhu Z, Zhou J, Manor B, Wang X, Fu W, Liu Y. Commentary: “Brain-Doping” Is It a Real Threat? *Front Physiol* 2019;10:1489.