



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Disponible en ligne sur  
**SciVerse ScienceDirect**  
 www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France  
**EM|consulte**  
 www.em-consulte.com



## Revue générale

# La stimulation transcrânienne à courant continu : un nouvel outil de neurostimulation

## Transcranial direct current stimulation: A new tool for neurostimulation

A. Thibaut, C. Chatelle, O. Gosseries, S. Laureys, M.-A. Bruno\*

Coma science group, Cyclotron research center and neurology department, university and university hospital of Liege, 8, allée du 6-Août, B30, 4000 Liege (Sart-Tilman), Belgique

### INFO ARTICLE

Historique de l'article :  
 Reçu le 27 octobre 2011  
 Reçu sous la forme révisée le  
 15 avril 2012  
 Accepté le 10 mai 2012  
 Disponible sur Internet le  
 7 septembre 2012

### Mots clés :

Stimulation transcrânienne à  
 courant continu  
 Thérapeutique  
 Maladies neurologiques  
 Excitabilité corticale  
 Neuroplasticité

### Keywords:

Transcranial direct current stimula-  
 tion  
 Therapeutic  
 Neurologic disorder  
 Cortical excitability  
 Neuroplasticity

### RÉSUMÉ

La stimulation transcrânienne à courant continu est une technique d'électrostimulation non invasive qui permet de modifier l'excitabilité corticale. La stimulation anodique peut améliorer les fonctions sous-tendues par l'aire stimulée alors que la cathode induit une diminution de celles-ci. De nombreuses études cliniques ont été réalisées afin d'améliorer les déficits moteurs ou langagiers survenant après un accident vasculaire cérébral, mais également pour diminuer les symptômes de la dépression, des douleurs chroniques, des troubles de la mémoire, ou encore des acouphènes. Les résultats ont montré que, si un effet positif de la tDCS est observé, les bénéfices ne durent pas dans le temps. Les études actuelles montrent que la tDCS est une technique prometteuse pour la récupération des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral, mais également pour réduire les déficits cognitifs, la dépression et les douleurs chroniques. De plus, cet outil est fiable, simple et peu coûteux, ce qui facilite son intégration dans un service médical et hospitalier.

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### ABSTRACT

Transcranial direct current stimulation (tDCS) is a safe method to modulate cortical excitability. Anodal stimulation can improve the stimulated area's functions whereas cathodal stimulation reduces them. Currently, a lot of clinical trials have been conducted to study the effect of tDCS on post-stroke motor and language deficits, in depression, chronic pain, memory impairment and tinnitus in order to decrease symptoms. Results showed that, if an effect is observed with tDCS, it does not persist over time. Current studies suggest that direct current stimulation is a promising technique that helps to improve rehabilitation after stroke, to enhance cognitive deficiencies, to reduce depression and to relieve chronic pain. Moreover, it is a safe, simple and cheap device that could be easily integrated in a rehabilitation program.

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

\* Auteur correspondant.

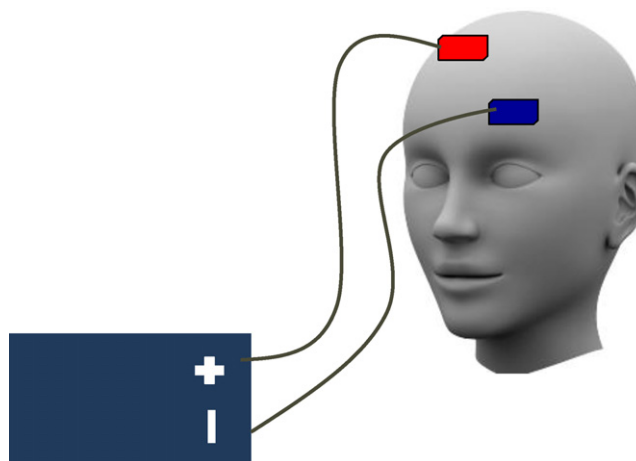
Adresse e-mail : [ma.bruno@ulg.ac.be](mailto:ma.bruno@ulg.ac.be) (M.-A. Bruno).

0035-3787/\$ – see front matter © 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

doi:10.1016/j.neurol.2012.05.008

## 1. Introduction

Depuis le début des années 1960, les scientifiques ont tenté de stimuler le cerveau afin de suppléer certains déficits moteurs ou cognitifs grâce à différentes techniques telles que la stimulation cérébrale profonde, la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) ou encore la stimulation transcrânienne à courant continu (transcranial direct current stimulation – tDCS). La stimulation cérébrale profonde est utilisée afin de traiter la maladie de Parkinson (Limousin et al., 1995 ; Voon et al., 2009) et les dépressions sévères résistantes aux médicaments (Lozano et al., 2008 ; Holtzheimer et Mayberg, 2010). Cependant, ces techniques ne sont pratiquées que dans les cas extrêmes résistants aux traitements médicamenteux chez les patients atteints de la maladie de Parkinson et sont encore au stade expérimental pour les patients souffrant de dépression sévère (Bewernick et al., 2012). La SMT est connue pour ses effets dans le traitement de troubles neurologiques telles que les migraines (Clarke et al., 2006), la dépression (Padberga et al., 1999) et la dystonie (Havrankova et al., 2010). Bien que son utilisation ne soit pas encore répandue en pratique clinique, cette technique a pour avantage principal d'être non invasive. Les facteurs de risques et complications sont, dès lors, nettement moindres que ceux provoqués par la stimulation cérébrale profonde, qui nécessite l'implantation d'électrodes dans le cerveau. Toutefois, des contre-indications et effets indésirables persistent. En effet, cette technique peut induire des crises d'épilepsie, des sensations inconfortables ou douloureuses, des migraines, et dans le cadre d'une mauvaise utilisation, elle peut également provoquer des brûlures cutanées (Rossi et al., 2009). Cependant, depuis la publication des recommandations de sécurité, aucun effet secondaire grave n'a été observé. La tDCS est, quant à elle, une technique de stimulation non invasive utilisant un courant électrique continu pour moduler l'activité neuronale sous-jacente aux électrodes placées sur le scalp des sujets. Plus précisément, une batterie connectée à deux électrodes, une anode activatrice et une cathode inhibitrice, envoie un courant continu d'une amplitude variant de 1 à 2 mA. La taille des électrodes varie en fonction des protocoles utilisés par les groupes de recherche ; leur position est fonction de la finalité de la stimulation. Cette méthode de stimulation est plus confortable, plus simple d'utilisation et moins coûteuse que la SMT. Les seules contre-indications sont la présence d'un pacemaker et l'implantation(s) cérébrale(s) d'objets métalliques (George et Aston-Jones, 2010). En ce qui concerne les effets immédiats ressentis par les sujets sains et les patients, aucun effet délétère n'a jamais été objectivé. Seule une partie de la population peut ressentir des picotements durant les premières secondes de stimulation ou la sensation d'un flash de lumière si la stimulation est allumée ou coupée brusquement (Nitsche et al., 2003b). Les premières études ont été réalisées sur des animaux dans les années 1960. Depuis, la tDCS a fait l'objet de nombreuses recherches tant chez des sujets sains que chez des patients atteints de pathologies diverses telles que la parésie d'un membre ou l'aphasie à la suite d'un accident vasculaire cérébral (AVC), la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer, la dépression ou la fibromyalgie (Creutzfeldt et al., 1962 ; Bindmann et al.,



**Fig. 1 – Schéma du placement des électrodes (rouge : anode ; bleu : cathode) pour une stimulation du cortex moteur primaire droit.**

1964 ; Purpura et McMurtry, 1965). Au sein de cette revue, nous décrivons les mécanismes d'actions liés à la tDCS. Nous exposerons ensuite les résultats des précédentes études et décrivons les principaux effets obtenus sur les capacités motrices, mnésiques et langagières. Nous discuterons également des effets antidépresseurs et antalgiques de cette technique (Fig. 1).

## 2. État des connaissances

### 2.1. Mécanisme d'action

La tDCS permet de moduler l'activité neuronale grâce à l'induction d'un débit relativement faible de courant électrique continu à travers le cortex cérébral via deux électrodes, l'anode et la cathode, placées au niveau du scalp. Selon la polarité de la stimulation, cette technique induit une augmentation ou une diminution de l'excitabilité corticale et de l'activité spontanée des neurones (Jacobson et al., 2012). L'hyperexcitabilité neuronale de la région stimulée est produite par l'anode qui provoque l'abaissement du seuil de dépolarisation de la membrane (Purpura et McMurtry, 1965 ; Jefferys, 1995). Inversement, la cathode induit une augmentation du seuil de dépolarisation et, par conséquent, une diminution de l'activité neuronale sous-jacente. De manière générale, l'anode améliore la fonction de l'aire stimulée alors que la cathode réduit les performances ou n'a aucun effet (Jacobson et al., 2012). Dans la majorité des protocoles, les courants utilisés sont de 1 ou 2 mA et sont appliqués durant cinq à 30 minutes sur une aire corticale spécifique (Been et al., 2007). Une partie de l'influx est perdu au niveau du scalp et du crâne (entre 40 et 60 %), le reste du courant atteint le cortex et ses neurones (Miranda et al., 2006). Les effets instantanés sont la conséquence de l'hyperexcitabilité neuronale provoquée par l'anode ou l'hypoexcitabilité induite par la cathode. Les effets à moyen terme, quant à eux, perdurent environ une heure (Nitsche et Paulus, 2001) et auraient un lien avec une activation des récepteurs N-méthyl-D-aspartate (NMDA),

récepteurs activés par le glutamate et impliqués dans la mémoire cellulaire (Nitsche et Paulus, 2001). En effet, il a été démontré qu'un blocage des récepteurs NMDA par un antagoniste annulerait les effets de la tDCS (Liebetanz David et al., 2002 ; Nitsche et al., 2003a). Au contraire, la D-cyclosérine, agoniste des récepteurs au NMDA, prolongerait les effets de la stimulation (Nitsche et al., 2004). Ces résultats suggèrent que la tDCS anodique améliore l'efficacité des récepteurs NMDA grâce à la dépolarisation neuronale selon deux mécanismes indépendants mais pouvant agir ensemble (Nitsche et Paulus, 2000). Premièrement, une activité pré-synaptique de haute fréquence (30 Hz) serait induite par l'anode, menant à une diminution du seuil de dépolarisation pré- et post-synaptique, améliorant l'efficacité des récepteurs NMDA voltage-dépendants. Deuxièmement, des changements intracellulaires de calcium seraient provoqués par une tDCS prolongée et pourraient contribuer aux modifications des récepteurs NMDA dont l'efficacité dépend d'un taux intracellulaire de calcium élevé (Bennet, 2000). En effet, Nitsche et al. ont démontré que, lorsqu'un inhibiteur calcique est injecté, les effets à moyen terme de la tDCS anodique sont annulés (Nitsche et al., 2003a). Cependant, les mécanismes d'actions de la tDCS ne sont pas encore entièrement élucidés. A l'heure actuelle, il est établi que les effets instantanés sont la conséquence des modifications du potentiel de membrane induit par l'anode ou la cathode, ce qui a pour conséquence une modification de l'excitabilité nerveuse (Nitsche et al., 2003b). Les effets secondaires sont, quant à eux, liés aux modifications des récepteurs aux NMDA, ainsi qu'à certains canaux ioniques, comme les canaux calciques (Liebetanz David et al., 2002). Il s'agit donc d'une combinaison de modifications axonales et synaptiques.

## 2.2. Effets sur la motricité

### 2.2.1. Sujets sains

Un grand nombre d'études ont été menées afin d'évaluer l'implication d'une stimulation de l'aire motrice chez des sujets sains. Les changements comportementaux sont évalués via divers tests moteurs dont le plus répandu est le Jebsen-Taylor Hand Function Test (Jebsen et al., 1969). Les modifications de l'activité neuronale induites par la tDCS ont pu être quantifiées grâce à la tomographie par émission de positons (TEP), à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), à l'électro-encéphalographie (EEG) et à la technique des potentiels évoqués moteurs (PEM).

De nombreuses études visant à évaluer l'impact clinique direct de la tDCS du cortex moteur ont été réalisées chez des sujets sains afin de quantifier les possibilités thérapeutiques de cette technique. Pour objectiver les répercussions de la tDCS sur les aptitudes physiques, Boggio et al. (2006a) ont évalué l'impact de la tDCS du cortex moteur primaire (M1) dominant et non dominant sur la dextérité manuelle. Comportementalement, les auteurs ont observé une amélioration de la dextérité manuelle de la main non dominante, la main gauche, à la suite d'une stimulation anodique de M1 non dominant. En revanche, la stimulation de l'hémisphère dominant n'a induit aucune amélioration de la dextérité de la main droite. Une autre étude a mis en évidence un bénéfice majoré de la tDCS du cortex M1 pour les sujets âgés par rapport

aux sujets jeunes (Hummel et al., 2010). Ces résultats montrent que la stimulation est davantage performante pour des fonctions qui peuvent encore être améliorées et moins pour celles dont la performance est déjà élevée (Desrosiers et al., 1999). L'impact de la tDCS sur les membres inférieurs a également été étudié en évaluant la force de pincement du gros orteil (Tanaka et al., 2009). La force de l'orteil controlatéral à la stimulation a significativement augmenté à la suite de la tDCS anodique et ce durant au moins trente minutes après la stimulation. Récemment, Schambra et al. ont étudié l'impact de la tDCS anodique de M1 gauche sur la coordination visuo-motrice. Ils ont observé une amélioration des performances de la main droite (Schambra et al., 2011).

Afin d'objectiver les effets neurophysiologiques qui sous-tendent la tDCS du cortex moteur et tenter de comprendre et d'expliquer les modifications cliniques induites par cette technique, des études utilisant la neurophysiologie (PEM, EEG) ou la neuroimagerie (TEP, IRMf) ont été réalisées. Une des premières est celle de Lang et al., qui a mis en évidence une augmentation de l'amplitude des PEM lors de la stimulation anodique et une diminution de l'amplitude lors de la stimulation cathodique de M1 gauche (Lang et al., 2004). Cette même équipe a étudié l'effet d'une stimulation cathodique et anodique de M1 gauche sur l'activité métabolique régionale grâce à la TEP réalisée avant et après la stimulation (Lang et al., 2005). Une diminution du flux sanguin régional a été observée à la suite de la tDCS cathodique comparé à l'activité observée avant la stimulation alors qu'une augmentation a été objectivée après la tDCS anodique. A la suite d'une stimulation anodique de M1 gauche, l'IRMf a pu mettre en évidence une augmentation de la connectivité fonctionnelle entre le cortex sensorimoteur primaire et les régions adjacentes mais une diminution du nombre de connexions fonctionnelles entre le cortex somato-moteur primaire et des régions corticales éloignées (Polania et al., 2011). L'EEG a pu objectiver les effets physiologiques de la stimulation anodique en montrant également une augmentation significative de la connectivité fonctionnelle entre le cortex prémoteur, moteur primaire et moteur supplémentaire de l'hémisphère stimulé (Polania et al., 2010). Une modification de la connectivité intra- et inter-hémisphérique a également été observée. La tDCS pourrait également induire des changements dans la synchronisation et l'organisation topographique fonctionnelle neuronale.

Ces études montrent que la tDCS anodique de M1 peut non seulement améliorer la dextérité et la force de la main ou du pied, mais également les capacités de coordination visuo-motrice des sujets. Sur le plan neurophysiologique, ces études montrent que la tDCS est capable de créer une neuroplasticité qui pourrait être en relation avec des modifications de la connectivité fonctionnelle cérébrale. La tDCS diminuerait les connexions cérébrales éloignées et focaliserait l'activité sur les cortex moteur primaire, sensorimoteur et préfrontal dorsolatéral, régions essentielles dans la réalisation d'un mouvement volontaire (Tableau 1).

### 2.2.2. Patients post accident vasculaire cérébral

Plusieurs études ont évalué l'effet de la tDCS du cortex moteur chez des sujets victimes d'un AVC présentant une parésie des membres supérieurs. Les effets ont été observés

**Tableau 1 – Protocoles et résultats des études réalisées sur la stimulation transcrânienne à courant continu du cortex moteur chez des sujets sains droitiers.**  
**Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies made on motor cortex in healthy right-handed subjects.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Baudewig et al., 2001)	Randomisée	6	A/C	1	M1 gauche (main)	5/1	Diminution de l'activité cérébrale (signal BOLD) après la stimulation cathodique
(Lang et al., 2004)	Randomisée	8	A/C	1	M1 gauche (main)	10/1	Augmentation de l'amplitude des PEM après stimulation anodique et diminution après stimulation cathodique
(Lang et al., 2005)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	8	A/C/placebo	1	M1 gauche (main)	10/1	Augmentation du flux sanguin cérébral régional après stimulation anodique et diminution après stimulation cathodique (au repos et en mouvement)
(Boggio et al., 2006a)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	8	A/placebo	1	M1 dominant et non dominant (main)	20/1	Amélioration de la motricité de la main non dominante après stimulation du cortex non dominant. Pas d'effet lors de la stimulation du cortex dominant
(Tanaka et al., 2009)	Randomisée/ double insu contrôlée	10	A/C/placebo	2	M1 gauche (jambe)	10/1	Amélioration de la force de la jambe droite après stimulation anodique mais pas du temps de réaction
(Galea et Celnik, 2009)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	9	A/C/placebo	1	M1 gauche (jambe)	30/1	Amélioration de la formation et de la rétention d'apprentissages moteurs. Augmentation de la cinétique des mouvements après la stimulation anodique
(Hummel et al., 2010)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	10	A/placebo	1	M1 gauche (main)	30/1	Amélioration de la rapidité d'exécution des mouvements de la main droite et amélioration de sa dextérité, davantage chez les personnes âgées que chez les sujets jeunes
(Polania et al., 2010)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	10	A/placebo	1	M1 gauche (main)	10/1	Augmentation significative de la connectivité fonctionnelle des cortex prémoteur, moteur et sensorimoteur
(Polania et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	13	A/placebo	1	M1 gauche (main)	10/1	Diminution des connexions entre SM1 et aires corticales éloignées. Augmentation des connexions entre SM1 et les cortex prémoteur et pariétal supérieur
(Schambra et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	93	A/placebo	1	M1 gauche et droit (main)	20/1	Amélioration de la réalisation d'une tâche visuo-motrice avec la main droite lors de la stimulation anodique de M1 gauche

A : anodique ; C : cathodique ; TEP : tomographie par émission de positons ; PEM : potentiels évoqués moteurs ; IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ; SM1 : aire sensori-motrice primaire.

lors des stimulations anodiques du cortex moteur lésé. La réalisation d'une stimulation anodique de M1 de la main a mis en évidence une amélioration de la force, de la dextérité et de la vitesse de réaction de la main parétique (Hummel et al., 2005). L'effet de la tDCS sur les membres inférieurs se traduit également par une augmentation de la force à la suite d'une stimulation anodique (Tanaka et al., 2011). La tDCS du

cortex moteur lésé peut donc être efficace tant pour les parésies des membres supérieurs qu'inférieurs. Par ailleurs, Fregni et al. ont montré une amélioration de la motricité de la main parétique tant à la suite de la stimulation anodique du cortex lésé qu'après la stimulation cathodique du cortex sain (Fregni et al., 2005a). Cela s'expliquerait par la diminution de l'activité locale induite par la cathode ; l'hémisphère



**Tableau 2 – Protocoles et principaux effets de la stimulation transcrânienne à courant continu du cortex moteur primaire chez des patients parétiques post accident vasculaire cérébral.**  
**Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies made on motor cortex in paretic stroke patients.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stimulée	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Hummel et Cohen, 2006)	Rapport de cas/ simple insu	1	A/placebo	1	M1 du côté lésé (main)	20/1	Amélioration de la force, de la performance et de la vitesse de réaction de la main parétique
(Hummel et al., 2005)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	6	A/placebo	1	M1 du côté lésé (main)	20/1	Amélioration de la motricité de la main parétique
(Hummel et Cohen, 2006)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	11	A/placebo	1	M1 du côté lésé (main)	20/1	Augmentation de la force et diminution du temps de réaction
(Fregni et al., 2005a)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	6	A/C/placebo	1	M1 du cortex lésé et préservé (main)	20/1	Amélioration de la motricité de la main parétique à la suite des deux types de stimulation
(Boggio et al., 2006a)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	8	A/C/placebo	1	M1 des côtés lésé et préservé (main)	20/5 (1/j pendant 5j)	Augmentation de la dextérité manuelle après la stimulation anodique du cortex lésé et après la stimulation cathodique du cortex sain
(Tanaka et al., 2011)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	8	A/placebo	2	M1 du côté lésé (jambe)	10/1	Augmentation de la force d'extension du membre inférieur parétique

A : anodique ; C : cathodique ; M1 : cortex moteur primaire ; AVC : accident vasculaire cérébral.

endommagé serait moins influencé par une inhibition transcallosale excessive. La stimulation cathodique diminuerait l'inhibition transcallosale entre les deux hémisphères, ce qui augmenterait l'efficacité de M1 opposé et, dans le cas présent, lésé (Fregni et al., 2005b).

Comme observé chez les sujets sains, les études précitées montrent le bénéfice des stimulations anodiques sur les fonctions motrices du membre parétique post-AVC (Tableau 2). De plus, la stimulation cathodique du cortex sain semble également efficace quant au traitement des parésies secondaires à un AVC.

### 2.3. Effets sur la mémoire

#### 2.3.1. Sujets sains

Une étude menée par Fregni et al. (2005b) a montré l'impact de la tDCS anodique du cortex préfrontal dorsolatéral (PFDL) sur la mémoire de travail de sujets sains. La stimulation a amélioré les performances lors d'une tâche de N-back (séquence de lettres dans laquelle le sujet doit reconnaître une lettre se répétant à trois lettres d'intervalle). Plus récemment, la tDCS du cortex PFDL a été couplée à l'EEG afin d'étudier l'impact de la stimulation anodique sur l'activité neuronale (Keeser et al., 2010). Une réduction significative des ondes delta a été enregistrée au niveau du cortex préfrontal, du cortex cingulaire antérieur et du gyrus frontal médial alors qu'une augmentation des ondes beta a été observée au niveau du cortex préfrontal médian. La diminution des ondes delta et l'augmentation des ondes beta ont également été corrélées avec l'amélioration de l'état de vigilance (Barry et al., 2009). De plus, les cortex préfrontal et frontal médial sont impliqués dans les tâches mnésiques, ces modifications de l'activité

neuronale pourraient expliquer les performances majorées des sujets à la suite de la stimulation anodique. Une étude utilisant l'EEG pour quantifier les effets de la tDCS a mis en évidence une corrélation entre la tDCS et l'activité neuronale oscillatoire (Zaehle et al., 2011). À la suite de la stimulation anodique, une augmentation de l'activité neuronale oscillatoire a été observée alors qu'une diminution de cette activité a été notée à la suite de la stimulation cathodique. Ces résultats suggèrent que l'amélioration de la mémoire de travail après la tDCS anodique est sous-tendue par une augmentation des oscillations neuronales. L'impact de la tDCS sur la mémoire visuelle a également été étudié en stimulant le cortex temporal antérieur bilatéralement (Chi et al., 2010). Les résultats ont montré une amélioration de la mémoire visuelle grâce à un test de reconnaissance d'items pour les deux types de stimulations (anode à gauche, cathode à droite ou l'inverse). La latéralité de la stimulation ne semble donc pas modifier les bénéfices de la tDCS. Une récente étude de neuroimagerie a mis en évidence l'effet d'une stimulation préfrontale sur la connectivité neuronale grâce à l'IRMf. Cette technique a montré une modulation de la connectivité du réseau du mode par défaut et des réseaux fronto-pariétaux bilatéralement à la suite d'une stimulation du cortex PFDL gauche (Keeser et al., 2011). Cette étude met en évidence les mécanismes sous-jacents de la tDCS qui pourraient expliquer, en partie, les effets cognitifs de la stimulation.

Ces résultats mettent donc en évidence les bénéfices des stimulations frontales sur la mémoire de travail des sujets sains pour des stimulations de 1 ou 2 mA, durant dix, 20 ou 30 minutes (Tableau 3). Dans le cadre des stimulations à visée cognitive, les paramètres de stimulation ne semblent donc pas influencer sur les résultats obtenus.

**Tableau 3 – Protocoles expérimentaux et résultats des principales études évaluant l'impact mnésique de la stimulation transcrânienne à courant continu chez les sujets sains.**  
**Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies assessing memory in healthy subjects.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Marshall et al., 2004)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	30	A/C/placebo	1	PFDL gauche	30/1	Lors d'une stimulation anodique réalisée pendant le premier cycle de sommeil profond, amélioration de la mémoire de travail et procédurale lors du réveil du patient après le premier cycle de sommeil profond
(Fregni et al., 2005b)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	15	A/C/placebo	1	PFDL gauche	10/1	Amélioration de la performance lors d'une tâche de lettres séquentielles (mémoire de travail) après stimulation anodique
(Chi et al., 2010)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	12	A/C/placebo	2	Cortex temporal antérieur bilatéralement	13/1	Amélioration de la mémoire visuelle pour les deux stimulations (anode à gauche-cathode à droite ou l'inverse)
(Keeser et al., 2010)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	10	A/placebo	1	PFDL gauche	20/1	Réduction significative des ondes delta du cortex préfrontal, du cortex cingulaire antérieur et du gyrus frontal médial. Amélioration de la mémoire de travail
(Zaehle et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	16	A/C/placebo	1	PFDL gauche	15/1	Amélioration de la mémoire de travail et du temps de réaction après stimulation anodique et diminution de la mémoire de travail après la stimulation cathodique
(Mulquiney et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	12	A/placebo	1	PFDL gauche	10/1	Amélioration de la mémoire de travail

A : anodique ; C : cathodique ; PFDL : Préfrontal dorsolatéral.

### 2.3.2. Patients présentant des troubles cognitifs

Ferrucci et al. (2008) ont apprécié l'effet de la tDCS auprès de patients atteints de la maladie d'Alzheimer. À la suite de la stimulation anodique de l'aire temporo-pariétale, les patients ont montré une amélioration significative des capacités mnésiques et une diminution après la stimulation cathodique. La tDCS peut également avoir un impact positif sur les troubles mnésiques ou attentionnels des patients atteints d'une maladie neurodégénérative (Parkinsoniens, Alzheimer) ou victimes d'un AVC (Lim et alexander, 2009) et plus particulièrement, être bénéfique pour la mémoire de travail (Jo et al., 2009) et les performances au test Go/No-Go (Kang et al., 2009).

En résumé, dans la continuité des études précédentes, la stimulation anodique, par son action sur l'excitabilité nerveuse, améliore de manière transitoire la mémoire de travail et l'attention des patients victimes de troubles mnésiques ou attentionnels secondaires à une maladie neurodégénérative ou à un AVC (Tableau 4).

### 2.4. Effets sur le langage

Une première étude, qui a été réalisée par Iyer et al. (2005) sur 103 volontaires sains a montré une amélioration de la fluence verbale chez des sujets ayant reçus une stimulation anodique de 2 mA du cortex préfrontal dorsolatéral. Les stimulations

anodiques de 1 mA ainsi que les stimulations cathodiques de 1 et 2 mA n'ont, en revanche, induit aucune modification de la performance des sujets. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance d'une intensité suffisante pour induire un effet bénéfique sur le langage. L'effet d'une stimulation des aires de Wernicke et de Broca a également été étudié, montrant une augmentation de la rapidité de réponse à la dénomination d'objets (Sparing et al., 2008) et une amélioration de l'aisance verbale ainsi qu'une meilleure performance lors d'une tâche de fluence sémantique et phonémique (Cattaneo et al., 2011). Contrairement aux précédents résultats, la stimulation cathodique peut s'avérer bénéfique dans le cadre d'une aphasia de Broca à la suite d'un AVC (Monti et al., 2008). Ces effets positifs peuvent s'expliquer par l'augmentation anormale de l'inhibition corticale survenant lors d'un AVC. En diminuant l'excitabilité neuronale, l'inhibition corticale est également diminuée et la fonction sous-tendue par l'aire corticale est facilitée. À l'inverse, lorsque l'électrode stimulatrice est placée sur la région préservée du langage, c'est la tDCS anodique qui induit une amélioration des performances et non la cathode (Baker et al., 2010).

La stimulation cathodique améliorerait donc les capacités langagières des patients aphasiques lorsque la stimulation est effectuée sur le cortex lésé, alors que c'est la stimulation anodique qui est bénéfique lorsque l'électrode est placée sur le

**Tableau 4 – Protocoles expérimentaux et résultats des principales études évaluant l'impact mnésique de la stimulation transcrânienne à courant continu chez des patients Alzheimer et post-AVC.**  
**Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies assessing memory in patients with Alzheimer's and stroke.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Ferrucci et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	10 – Alzheimer	A/e/placebo	1,5	Cortex temporo-pariétal gauche et droit	20/1	Amélioration de la mémoire de travail après la stimulation anodique et diminution après stimulation cathodique
(Jo et al., 2009)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	10 – post-Ave	A/placebo	1	PFDL gauche	20/1	Amélioration de la mémoire de travail
(Kang et al., 2009)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	10 – post-Ave 10 – sains	A/placebo	2	PFDL gauche	20/1	Amélioration de l'attention chez les patients post-AVC après la stimulation anodique

A : anodique ; C : cathodique.

cortex sain. De plus, l'intensité et le temps des stimulations semblent influencer les résultats obtenus (Tableau 5).

## 2.5. Effets sur la dépression

Des études ont mis en évidence une diminution des symptômes dépressifs selon les scores obtenus à l'Hamilton Depression Rating Scale, la Beck Depression Inventory (Fregni et al., 2006a) et au test Go/No-Go (Boggio et al., 2007) à la suite de stimulations quotidiennes. Les bénéfices des stimulations anodiques du cortex PFDL se traduisent ici par une diminution du degré de dépression. Rigonatti et al. ont comparé l'effet de la prise quotidienne d'un agent pharmacologique (fluoxétine) et de stimulations journalières anodiques de 2 mA durant 30 minutes pendant dix jours chez 42 sujets dépressifs sévères (Rigonatti et al., 2008). Les auteurs ont noté une diminution similaire des symptômes dépressifs suite au traitement pharmacologique et aux stimulations cérébrales. Récemment, les effets antidépresseurs de la tDCS ont été relativisés. En effet, à la suite de la stimulation du cortex préfrontal quotidiennement durant trois semaines, une amélioration de l'humeur a été mise en évidence (augmentation significative du score à Montgomery-Asberg Depression Rating Scale) (Loo et al., 2012). Cependant, le nombre de patients montrant une amélioration n'était pas significativement différent par rapport à la stimulation placebo et les résultats étaient bien inférieur aux précédents résultats observés (28 % d'efficacité dans la présente étude ; 60 % dans l'étude de (Fregni et al., 2006b) et 43 % dans l'étude de [Boggio et al., 2008]).

La différence majeure des études visant à traiter la dépression par rapport aux études sur la motricité, la mémoire ou le langage est la répétition quotidienne des stimulations puisque la tDCS a été reproduite entre cinq et dix fois selon les études (Tableau 6). Ces stimulations répétées ont permis de prolonger les effets bénéfiques puisque ceux-ci ont perduré jusqu'à un mois alors qu'une stimulation unique a une durée d'action comprise entre dix minutes et deux heures (Hummel et Cohen, 2006). Cette découverte est encourageante quant à l'avenir de la technique, qui, jusqu'ici ne pouvait induire que des bénéfices éphémères. Cependant, les effets sont relatifs et

la stimulation n'est pas effective chez l'ensemble des patients souffrant de dépression sévère (Tableau 6).

## 2.6. Effets antalgiques

La tDCS a fait l'objet de nombreuses études auprès des patients fibromyalgiques, souffrant d'un traumatisme vertébral, de la sclérose en plaque ou encore de douleurs chroniques (Tableau 7). Fregni et al. ont montré que des stimulations anodiques de 20 minutes durant cinq jours consécutifs de M1 gauche diminuaient la sensation de douleur de patients durant trois semaines (Fregni et al., 2006c). Ces bénéfices peuvent s'expliquer par le dysfonctionnement du système nerveux central et la diminution de seuil de la sensibilité thermoalgésique (Petzke et al., 1999). De plus, la tDCS pourrait améliorer l'excitabilité cérébrale et la transmission d'informations et, par conséquent, réduire les dysfonctionnements sensitifs dont souffrent ces patients. Cette même équipe a étudié l'impact de la tDCS chez des patients souffrant de douleurs centrales à la suite d'un traumatisme de la moelle épinière (Fregni et al., 2006d). Les résultats ont également mis en évidence une diminution des sensations douloureuses lors de stimulations anodiques de M1. La tDCS anodique permettrait de diminuer l'inhibition intracorticale et, de ce fait, modifierait l'excitabilité cortico-corticale impliquée dans les sensations douloureuses. Plus récemment, une étude a également montré l'effet positif de la tDCS sur les algies de patients souffrant de la sclérose en plaques (Mori et al., 2010). Comme pour les études précédentes, une augmentation du seuil de douleur a été objectivée à la suite d'une semaine de stimulations. Cette amélioration a perduré jusqu'à trois semaines après la stimulation. D'autres régions cérébrales ont également été stimulées, telle la région visuelle primaire (V1) chez des patients migraineux. La tDCS a induit une diminution du seuil de phosphènes déclenchée par la SMT lors de la stimulation anodique (Chadaide et al., 2007). Bien que cette étude n'évalue pas directement les effets antalgiques de la tDCS, elle démontre son action sur les migraines en diminuant le seuil d'apparition de l'un de ses symptômes,



**Tableau 5 – Protocoles et résultats des études des effets de stimulation transcrânienne à courant continu sur le langage de sujets sains et aphasiques.**  
**Protocols and results of studies assessing transcranial direct current stimulation effects on language in healthy subjects and aphasic stroke patients.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/ nombre de stim	Résultats
(Iyer et al., 2005)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	103 – sains	A/C/placebo	1 et 2	Cortex PFDL	20/2	Amélioration de la fluence verbale pour l'intensité de 2mA de la stimulation anodique
(Sparing et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	15 – sains	A/C/placebo	2	Wernicke et région homologue de l'hémisphère droit	7/1	Augmentation de la rapidité de réponse à la dénomination d'objets après stimulation anodique de l'aire de Wernicke
(Flöel et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	19 – sains	A/C/placebo	1	Wernicke	20/1	Amélioration du temps d'apprentissage et du nombre de réponses correctes après stimulation anodique
(Monti et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	8 – aphasiques	A/C/placebo	2	Broca et cortex occipital	20/1	Amélioration de l'expression verbale et augmentation du nombre d'objets correctement prononcés après la stimulation cathodique
(Baker et al., 2010)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	10 – aphasiques	A/placebo	1	Cortex préfrontal préservé	20/5	Amélioration du nombre de réponses correctes à la nomination d'items, mais pas d'accumulation des performances après cinq jours
(Fertonani et al., 2010)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	12 – sains	A/C/placebo	2	PFDL gauche	8 et 10/1	Amélioration du langage (nomination d'objets) et de l'attention (tâche d'attention) après la stimulation anodique de dix minutes
(Cattaneo et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	10 – sains	A/placebo	2	Broca	20/1	Amélioration de l'aisance verbale, meilleures performances lors d'une meilleure performances lors d'une tâche de fluence sémantique et phonémique

A : anodique ; C : cathodique.

les phosphènes, par une hyperexcitabilité corticale due à la stimulation anodique. D'autres études ont néanmoins démontré un effet positif direct de la tDCS sur les migraines. En effet, des stimulations cathodiques quotidiennes de V1 durant six semaines diminuent l'intensité de la douleur ainsi que la durée des migraines (Antal et al., 2011). Pour appuyer l'effet général antalgique du courant continu chez des sujets douloureux chroniques, Antal et al. (2010) ont exploré la répercussion de ces stimulations auprès de patients souffrant de douleurs chroniques résistantes aux médicaments, toutes étiologies confondues. La stimulation anodique de M1 durant cinq jours a induit une diminution

significative et durable de la douleur des sujets puisque les effets ont perduré quatre semaines après la stimulation. Cette étude met en avant les effets antalgiques des stimulations anodiques de M1 pour tous types de pathologies causant des douleurs chroniques. D'autres études se sont penchées sur les effets de la tDCS sur des douleurs aiguës. Récemment, Borckardt et al. ont montré l'effet antalgique de la tDCS anodique du cortex préfrontal dorsolatéral gauche après une cholangio-pancréatographie rétrograde (Borckardt et al., 2011). A la suite de la tDCS, les patients ont significativement pris moins d'antalgiques et se sont moins réveillés durant la nuit à cause de la douleur par rapport aux

**Tableau 6 – Protocoles et résultats des études réalisées sur les effets de la stimulation transcrânienne à courant continu chez les patients dépressifs.**  
**Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies in depressive patients.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courent (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Fregni et al., 2006b)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	42	A/placebo	1	PFDL gauche	20/5	Diminution des symptômes dépressifs
(Boggio et al., 2007)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	26	A/placebo	2	PFDL gauche et occipitale	10/10	Diminution des symptômes dépressifs après stimulation du cortex PFDL gauche et amélioration de l'attention soutenue. Les bénéfices ont perduré jusqu'à dix jours
(Ferrucci et al., 2009)	Croisée	14	A/C	2	Cortex PFDL gauche (anode) et droit (cathode)	10/(2/j pd 5j)	Amélioration de l'humeur qui perdure quatre semaines après la fin des stimulations
(Rigonatti et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	42	A/placebo	2	PFDL gauche	20/10	Diminution des symptômes de dépression tant pour la fluoxetine que pour la tDCS bien que l'effet antidépresseur soit plus rapide avec la tDCS
(Bueno et al., 2011)	Rapport de cas	1 – post-AVC	A	2	PFDL gauche	30/10	Amélioration importante de la dépression post-AVC et de la cognition

A : anodique ; AVC : accident vasculaire cérébral.

patients n'ayant pas bénéficié de la stimulation. Cette étude montre donc l'effet bénéfique de la tDCS après une intervention chirurgicale sur la douleur aiguë.

L'ensemble de ces résultats sont prometteurs quant à la gestion de la douleur tant chez les patients douloureux chroniques que pour traiter des douleurs aiguës (Tableau 7).

### 2.7. Effets chez les Parkinsoniens

Quatre études ont observé les effets moteurs et mnésiques de la tDCS sur des personnes atteintes de la maladie de Parkinson. Fregni et al. (2006a) ont étudié les effets de la tDCS sur M1 ainsi que sur le cortex préfrontal dorsolatéral. La tDCS anodique a induit une amélioration de la fonction motrice alors que les stimulations cathodiques de M1 et anodique et cathodique du cortex PFDL n'ont montré aucun effet sur la motricité des patients. Bien que la stimulation du cortex PFDL n'a eu aucun impact sur les évaluations motrices effectuées, Boggio et al. ont démontré l'effet positif d'une tDCS anodique du cortex PFDL gauche sur la mémoire de travail des patients parkinsoniens (Boggio et al., 2006b). En effet, à la suite de la

stimulation anodique, une augmentation des réponses correctes et une diminution du nombre d'erreurs ont été observées lors d'une tâche N-back. Benninger et al. ont étudié l'effet de stimulations mixtes (M1 et cortex préfrontal) sur les performances motrices et mentales des patients parkinsoniens. Chaque patient a reçu huit stimulations anodiques ou placebo, lors de quatre séances (séances 1, 3, 5 et 7), l'anode était placée sur M1 et lors des quatre autres (séances 2, 4, 6 et 8), l'anode était placée sur le cortex préfrontal. Les résultats ont montré une amélioration de la bradykinésie ainsi que de la marche.

Ces études soulignent l'impact positif des stimulations chez des patients atteints de la maladie de Parkinson tant pour leurs troubles moteurs que mnésiques (Tableau 8).

## 3. Perspectives

La tDCS est un outil de stimulation cérébrale simple d'utilisation et sans effet lésionnel secondaire permettant de modifier l'excitabilité neuronale d'une aire corticale

**Tableau 7 – Protocoles et résultats des études sur les effets de la stimulation transcrânienne à courant continu de sujets douloureux.****Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies in patients with chronic pain.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stim	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Fregni et al., 2006d)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	32 – fibro- myalgiques	A/placebo	2	PFDL gauche et M1 gauche	20/5	Diminution de la douleur
(Fregni et al., 2006a)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	17 – trauma médullaire	A/placebo	2	M1 gauche	20/5	Diminution significative de la douleur
(Chadaide et al., 2007)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	16 – migraineux 9 – sains	A/C/placebo	1	V1	10/1	Diminution du seuil de phosphènes déclenchée par une SMT sur V1 lors de la stimulation anodique
(Boggio et al., 2008)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	20 – sains	A/placebo	2	M1, PFDL et V1	10/1	Augmentation du seuil de la douleur aux PES et diminution de la perception de la douleur
(Mori et al., 2010)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	19 – sclérose en plaques	A/placebo	2	M1 gauche	10/5	Amélioration des échelles algiques et de la qualité de vie des patients jusqu'à trois semaines après les stimulations
(Antal et al., 2010)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	23 – toutes étiologies	A/placebo	1	M1	20/5	Diminution de la douleur jusqu'à quatre semaines
(Antal et al., 2011)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	26 – migraineux	C/placebo	1	V1	15/18 (3/sem durant 6 sem)	Diminution de l'intensité de la douleur et de la durée des migraines après les six semaines de stimulations
(Borckardt et al., 2011)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	21 – cholangio- pancréato- graphie	A/placebo	2	PFDL gauche	20/1	Diminution des doses d'hydromorphone prises par le patient et des troubles du sommeil liés à la douleur

A : anodique ; C : cathodique ; PFDL : préfrontal dorsolatéral ; SMT : stimulation magnétique transcrânienne ; PES : potentiels évoqués somestésiques ; V1 : cortex visuel primaire.

**Tableau 8 – Protocoles et principaux résultats des études réalisées chez les patients parkinsoniens.****Protocols and results of transcranial direct current stimulation studies in parkinsonian patients.**

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stimulée	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Fregni et al., 2006c)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	17	A/C/placebo	1	M1 gauche et PFDL gauche	20/1	Amélioration de la fonction motrice à la suite de la stimulation anodique de M1. Augmentation de l'amplitude des PEM après stimulation anodique de M1 et diminution de celle-ci après stimulation cathodique
(Boggio et al., 2006b)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	18	A/placebo	1 et 2	PFDL et M1 gauche	20/1	Amélioration de la mémoire de travail à la suite de la stimulation de 2 mA du cortex PFDL
(Grüner et al., 2010)	Randomisée/ simple insu/ contrôlée	14	A/C/placebo	1	M1 gauche	10/1	Diminution de l'effet de la SMT sur la bradikinsie après la stimulation cathodique. Aucun effet après la stimulation anodique

Tableau 8 (Suite)

Études	Type d'étude	n	Type de stim	Courant (mA)	Aire stimulée	Durée stim (min)/nombre de stim	Résultats
(Benninger et al., 2010)	Randomisée/ double insu/ contrôlée	25	A/placebo	2	M1 gauche et cortex PFDL	20/8 (4 de M1 et 4 de PFDL, en intervalle)	Amélioration de la marche et de la bradykinésie durant trois mois

A : anodique ; C : cathodique ; M1 : cortex moteur primaire, PEM : potentiels évoqués moteurs ; SMT : stimulation magnétique transcrânienne ; PFDL : préfrontal dorsolatéral.

spécifique. Les différentes études exposées dans cette revue démontrent les bénéfices de la tDCS dans diverses pathologies telles que l'hémiplégie, les troubles mnésiques et du langage, la dépression et les douleurs chroniques. Cependant, certaines études montrent que les bénéfices ne perdurent pas dans le temps et que, parfois, les améliorations observées sont limitées (Tableaux 1-8). C'est pourquoi il est encore trop tôt pour parler de la tDCS en tant qu'outil thérapeutique efficace. Toutefois, de nouvelles études sont en cours afin de trouver les paramètres et protocoles de stimulations optimaux. L'investigation des effets neurophysiologiques qui sous-tendent la stimulation est également indispensable afin de comprendre les mécanismes d'action de la tDCS. En ce qui concerne les paramètres de stimulation, ceux-ci divergent fortement d'une étude à l'autre. En effet, l'intensité des stimulations varie de 1 à 2 mA et la durée des stimulations s'étend de cinq à 30 minutes. Dès lors, de nouvelles investigations doivent encore être réalisées afin de déterminer les paramètres de stimulation optimaux selon le bénéfice recherché. De plus, la plupart des études sur les effets moteurs et mnésiques de la tDCS chez les sujets sains et sur le langage des patients aphasiques, ont été réalisées en simple insu, ce qui pourrait induire un biais de l'expérimentateur et influencer sur les résultats. C'est pourquoi, de nouvelles investigations en double insu devraient être effectuées afin de s'assurer que les résultats obtenus n'ont pas été augmentés par rapport aux bénéfices réels que peut induire la tDCS. Une fois les paramètres optimaux définis et la catégorisation des patients chez qui la tDCS est efficace, cette technique pourrait être introduite à grande échelle dans les centres de réhabilitation pour la réadaptation fonctionnelle des patients parétiques et/ou aphasiques post-AVC, dans les cabinets médicaux ou dans les hôpitaux pour les troubles moteurs et cognitifs des patients souffrant de la maladie de Parkinson ou d'Alzheimer, mais également pour les algies des patients douloureux chroniques et pour le traitement des patients dépressifs. Les études futures devront aussi investiguer l'effet de la tDCS sur d'autres troubles neurologiques comme les troubles de la conscience post-coma, les troubles somesthésiques et les troubles visuels d'origine centrale. Le champ d'exploration des possibilités thérapeutiques qu'offre cette nouvelle technique est immense et les perspectives médicales sont considérables.

#### 4. Conclusion

La tDCS est une technique qui permet d'améliorer, à court terme, les performances motrices, mnésiques et langagières chez les sujets sains mais aussi chez les patients post-AVC, parkinsoniens ou encore chez ceux atteints de la maladie d'Alzheimer. Elle peut

aussi améliorer la condition de certains patients souffrant de douleurs chroniques ou de dépression. Une stimulation unique est capable de modifier les performances des sujets directement après la stimulation mais ces changements ne perdurent que quelques dizaines de minutes alors que des stimulations répétées quotidiennement durant cinq à dix jours induisent des modifications qui peuvent perdurer jusqu'à quatre semaines. De part son impact sur le système moteur et sur la cognition, la tDCS pourrait s'avérer un outil efficace et bénéfique dans la réhabilitation et la revalidation fonctionnelle des patients cérébrolésés. De plus, son action pourrait suppléer en partie certaines médications administrées aux patients, tels les traitements antidépresseurs ou antalgiques. Bien que de nouvelles études soient nécessaires afin d'évaluer l'étendue des applications de la tDCS et de mieux comprendre ses implications neurophysiologiques, cet outil de neurostimulation pourrait être utile dans la recherche et le traitement des troubles neurologiques.

#### Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

#### Remerciements

Cette étude a été financée par la fondation James S. McDonnell, le service public fédéral Santé publique, le Fond National pour la Recherche Scientifique Belge (FNRS), la Commission Européenne (Mindbridge, DISCOS, DECODER & COST), et l'université de Liège.

#### RÉFÉRENCES

- Antal A, Terney D, Kuhn S, Paulus W. Anodal transcranial direct current stimulation of motor cortex ameliorates chronic pain and reduces short intracortical inhibition. *J Pain Sympt Manag* 2010;39:890-903.
- Antal A, Kriener N, Lang N, Boros K, Paulus W. Cathodal transcranial direct current stimulation of the visual cortex in the prophylactic treatment of migraine. *Cephalgia* 2011;31(7):820-8.
- Baker J, Rorden C, Fridriksson J. Using transcranial direct current stimulation to treat stroke patients with aphasia. *Stroke* 2010;41(6):1229-36.
- Barry R, Clarke A, Johnstone S, Brown C. EEG differences in children between eyes-closed and eyes-open resting conditions. *Clin Neurophysiol* 2009;120:1806-11.

- Baudewig J, Siebner HR, Bestmann S, Tergau F, Tings T, Paulus W, et al. Functional MRI of cortical activations induced by transcranial magnetic stimulation (TMS). *Neuroreport* 2001;12(16):3543–8.
- Been G, Ngo T, Miller S, Fitzgerald P. The use of tDCS and CVS as methods of noninvasive brain stimulation. *Brain Res Rev* 2007;56:346–61.
- Bennet M. The concept of long term potentiation of transmission at synapses. *Progr Neurobiol* 2000;60:109–37.
- Benninger DH, Lomarev M, Lopez G, Wassermann EM, Li X, Considine E, et al. Transcranial direct current stimulation for the treatment of Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2010;81(10):1105–11.
- Bewernick BH, Kayser S, Sturm V, Schlaepfer TE. Long-term effects of nucleus accumbens deep brain stimulation in treatment-resistant depression: evidence for sustained efficacy. *Neuropsychopharmacology* 2012;37(9):1975–85.
- Bindmann L, Lippold O, Redfearn J. The action of brief polarizing currents on the cerebral cortex of the rat during current flow and in the production of long-lasting after-effects. *J Physiol* 1964;172:369–82.
- Boggio P, Castro L, Savagim E, Braitte R, Cruz V, Rocha R, et al. Enhancement of non-dominant hand motor function by anodal transcranial direct current stimulation. *Neurosci Lett* 2006a;404:232–6.
- Boggio P, Ferrucci R, Rigonatti S, Covre P, Nitsche M, Pascual-Leone A, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease. *J Neurol Sci* 2006b;249(1):31–8.
- Boggio P, Bermanpohl F, Vergara A, Muniz A, Naha F, Leme P, et al. Go-no-go task perform improvement after anodal transcranial direct current stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex in major depression. *J Affect Disord* 2007;101:91–8.
- Boggio PS, Rigonatti SP, Ribeiro RB, Myczkowski ML, Nitsche MA, Pascual-Leone A, et al. A randomized, double-blind clinical trial on the efficacy of cortical direct current stimulation for the treatment of major depression. *Int J Neuropsychopharmacol* 2008;11(2):249–54.
- Borckardt J, Romagnuolo J, Reeves S, Madan A, Frohman H, Beam W, et al. Feasibility, safety, and effectiveness of transcranial direct current stimulation for decreasing post-ERCP pain: a randomized, sham-controlled, pilot study. *Gastrointest Endosc* 2011;73(6):1158–64.
- Bueno VF, Brunoni AR, Boggio PS, Bensenor IM, Fregni F. Mood and cognitive effects of transcranial direct current stimulation in post-stroke depression. *Neurocase* 2011;17(4):318–22.
- Cattaneo Z, Pisoni A, Papagno C. Transcranial direct current stimulation over Broca's region improves phonemic and semantic fluency in healthy individuals. *Neuroscience* 2011;183:64–70.
- Chadaide Z, Arlt S, Antal A, Nitsche M, Lang N, Paulus W. Transcranial direct current stimulation reveals inhibitory deficiency in migraine. *Cephalgia* 2007;27(7):833–9.
- Chi R, Fregni F, Snyder A. Visual memory improved by non-invasive brain stimulation. *Brain Res* 2010;1353:168–75.
- Clarke B, Upton A, Kamath M, Al-Harbi T, Castellanos C. Transcranial magnetic stimulation for migraine: clinical effects. *J Headache Pain* 2006;7(5):341–6.
- Creutzfeldt O, Fromm G, Kapp H. Influence of transcortical d-c currents on cortical neuronal activity. *Exp Neurol* 1962;5:436–52.
- Desrosiers J, Hébert R, Bravo G, Rochette A. Aged-related changes in upper extremity performance of elderly people: a longitudinal study. *Exp Gerontol* 1999;34:393–405.
- Ferrucci R, Mameli F, Guidi I, Mrakic-Spota S, Vergari M, Marceglia S, et al. Transcranial direct current stimulation improves recognition memory in Alzheimer disease. *Neurology* 2008;71(7):493–8.
- Ferrucci R, Bortolomasi M, Vergari M, Tadini L, Salvoro B, Giacomuzzi M, et al. Transcranial direct current stimulation in severe, drug-resistant major depression. *J Affect Disord* 2009;118(1–3):215–9.
- Fertonani A, Rosini S, Cotelli M, Rossini PM, Miniussi C. Naming facilitation induced by transcranial direct current stimulation. *Behav Brain Res* 2010;208(2):311–8.
- Flöel A, Rösser N, Michka O, Knecht S, Breitenstein C. Noninvasive brain stimulation improves language learning. *J Cogn Neurosci* 2008;20(8):1415–22.
- Fregni F, Boggio P, Mansur C, Wagner T, Ferreira M, Lima M, et al. Transcranial direct current stimulation of the unaffected hemisphere in stroke patients. *Neuroreport* 2005a;16(14):1551–5.
- Fregni F, Boggio P, Nitsche M, Bermanpohl F, Antal A, Feredoes A, et al. Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Exp Brain Res* 2005b;166:23–30.
- Fregni F, Boggio P, Lima M, Ferreira M, Wagner T, Rigonatti S, et al. A sham-controlled, phase II trial of transcranial direct current stimulation for the treatment of central pain in traumatic spinal cord injury. *Pain* 2006a;122:197–209.
- Fregni F, Boggio P, Santos M, Lima M, Vieira A, Roigonatti S, et al. Non invasive cortical stimulation with transcranial direct current stimulation in Parkinson's disease. *Mov Disord* 2006b;21(10):19693–702.
- Fregni F, Boggio PS, Nitsche MA, Marcolin MA, Rigonatti SP, Pascual-Leone A. Treatment of major depression with transcranial direct current stimulation. *Bipolar Disord* 2006c;8(2):203–4.
- Fregni F, Gimenes R, Valle A, Ferreira M, Rocha R, Natalle L, et al. A randomized, sham-controlled, proof of principal study of transcranial direct current stimulation for the treatment of pain in fibromyalgia. *Arthritis Rheum* 2006d;54(12):3988–98.
- Galea JM, Celnik P. Brain polarization enhances the formation and retention of motor memories. *J Neurophysiol* 2009;102(1):294–301. Epub 2009 Apr 22.
- George M, Aston-Jones G. Noninvasive techniques for probing neurocircuitry and treating illness: vagus nerve stimulation (VNS), transcranial magnetic stimulation (TMS) and transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuropsychopharmacology* 2010;35(1):301–16.
- Grüner U, Eggers C, Ameli M, Sarfeld AS, Fink GR, Nowak DA. 1 Hz rTMS preconditioned by tDCS over the primary motor cortex in Parkinson's disease: effects on bradykinesia of arm and hand. *J Neural Transm* 2010;117(2):207–16.
- Havrankova P, KJech R, Walker N, Operto G, Tauchmanova J, Vymazal J, et al. Repetitive TMS of the somatosensory cortex improve writer's cramp and enhances cortical activity. *Neuro Endocrinol Lett* 2010;31(1):73–86.
- Holtzheimer PR, Mayberg H. Deep brain stimulation for treatment-resistant depression. *Am J Psychiatry* 2010;167:1437–44.
- Hummel F, Celnik P, Giraux P, Floel A, Wu W, Gerloff C, et al. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke. *Brain* 2005;128:490–9.
- Hummel F, Heise K, Celnik P, Floel A, Gerloff C, Cohen L. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex. *Neurobiol Aging* 2010;31(12):2160–8.
- Hummel F, Cohen L. Non-invasive brain stimulation: a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? *Lancet Neurol* 2006;5:708–12.
- Iyer M, Mattu U, Grafman J, Lomarev M, Sato S, Wassermann E. Safety and cognitive effect of frontal DC brain polarization in healthy individuals. *Neurology* 2005;64:872–5.
- Jacobson L, Koslowsky M, Lavidor M. tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: a meta-analytical review. *Exp Brain Res* 2012;216(1):1–10.



- Jebsen R, Taylor N, Trieschmann R, Trotter M, Howard L. An objective and standardized test of hand function. *Arch Phys Med Rehabil* 1969;50:311–9.
- Jefferys J. Nonsynaptic modulation of neuronal activity in the brain: electric currents and extracellular ions. *Physiol Rev* 1995;75:689–723.
- Jo J, Kim Y, Ko M, Ohn S, Joen B, Lee K. Enhancing the working memory of stroke patients using tDCS. *Am J Phys Med Rehabil* 2009;88(5):404–9.
- Kang EK, Beak MJ, Kim S, Paik NJ. Non-invasive cortical stimulation improves post-stroke attention decline. *Restor Neurol Neurosci* 2009;27(6):654–750.
- Keeser D, Padberg F, Reisinger E, Pogarell O, Kirsch V, Karch S, et al. Prefrontal direct current stimulation modulates resting EEG and event-related potentials in healthy subjects: a standardized low-resolution tomography (sLORETA) study. *Neuroimage* 2010;55(2):644–57.
- Keeser D, Meindl T, Bor J, Palm U, Pogarell O, Mulert C, et al. Prefrontal transcranial direct current stimulation changes connectivity of resting-state networks during fMRI. *J Neurosci* 2011;31(43):15284–93.
- Lang N, Nitsche M, Paulus W, Rothwell J, Lemon R. Effects of transcranial direct current stimulation over the human motor cortex on corticospinal and transcallosal excitability. *Exp Brain Res* 2004;156:439–43.
- Lang N, Siebner H, Ward N, Lee L, Nitsche M, Paulus W, et al. How does transcranial DC stimulation of the primary motor cortex alter regional neuronal activity in the human brain? *Eur J Neurol* 2005;22:495–504.
- Liebetanz David NMA, Frithjof T, Walter P. Pharmacological approach to the mechanisms of transcranial DC-stimulation-induced after-effects of human motor cortex excitability. *Brain Res Rev* 2002;125:2238–47.
- Lim C, Alexander M. Stroke and episodic memory disorders. *Neuropsychologia* 2009;47:3045–58.
- Limousin P, Pollak P, Benazzouz A, F Hoffmann D, Le Bas J, Broussolle E, et al. Effect on parkinsonian signs and symptoms of bilateral subthalamic nucleus stimulation. *Lancet* 1995;345:91–5.
- Loo CK, Alonzo A, Martin D, Mitchell PB, Galvez V, Sachdev P. Transcranial direct current stimulation for depression: 3-week, randomised, sham-controlled trial. *Br J Psychiatry* 2012;200(1):52–9.
- Lozano A, Mayberg H, Giacobbe P, Hamani C, Craddock C, Kennedy S. Subcallosal cingulate gyrus deep brain stimulation for treatment-resistant depression. *Biol Psychiatry* 2008;64:461–7.
- Marshall L, Mölle M, Hallschmid M, Born J. Transcranial direct current stimulation during sleep improves declarative memory. *J Neurosci* 2004;24(44):9985–92.
- Miranda P, Lomarev M, Hallett M. Modeling the current distribution during transcranial direct current stimulation. *Clin Neurophysiol* 2006;117:1623–9.
- Monti A, Cogiமானian F, Marceglia S, Mrakic-Sposta S, Vergari M, Zago S, et al. Improved naming after transcranial direct current stimulation in aphasia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2008;79:451–3.
- Mori F, Codeca C, Kusayanagi H, Monteleone F, Buttari F, Fiore S, et al. Effects of anodal transcranial direct current stimulation on chronic neuropathic pain in patients with multiple sclerosis. *J Pain* 2010;11(5):436–42.
- Mulquiney PG, Hoy KE, Daskalakis ZJ, Fitzgerald PB. Improving working memory: exploring the effect of transcranial random noise stimulation and transcranial direct current stimulation on the dorsolateral prefrontal cortex. *Clin Neurophysiol* 2011;122(12):2384–9.
- Nitsche M, Fricke K, Henschke U, Schlitterlau A, Liebetanz D, Lang N, et al. Pharmacological modulation of cortical excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans. *J Physiol* 2003a;553:293–301.
- Nitsche MA, Liebetanz D, Lang N, Antal A, Tergau F, Paulus W. Safety criteria for transcranial direct current stimulation (tDCS) in humans. *Clin Neurophysiol* 2003b;114(11):2220–2 [author reply 2222–2223].
- Nitsche M, Jaussi W, Liebetanz D, Lang N, Tergau F, Paulus W. Consolidation of externally induced human motor cortical neuroplasticity by D-cycloserine. *Neuropsychopharmacology* 2004;29:1573–8.
- Nitsche M, Paulus W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *J Physiol* 2000;527(3):633–9.
- Nitsche M, Paulus W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology* 2001;57:1899–901.
- Padberga F, Zwanzgera P, Thoma H, Kathmanna N, Haaga C, Greenberg B, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation (TMS) in pharmacotherapy-refractory major depression: comparative study of fast, slow and sham rTMS. *Psychiatry Res* 1999;88:163–71.
- Petzke F, Gracely R, Khine A, Clauw D. Pain sensitivity in patients with fibromyalgia (FM): expectancy effects on pain measurements. *Arthritis Rheum* 1999;42(S342).
- Polania R, Nitsche M, Paulus W. Modulating functional connectivity patterns and topological functional organization of the human brain with transcranial direct current stimulation. *Hum Brain Mapp* 2010.
- Polania R, Paulus W, Antal A, Nitsche MA. Introducing graph theory to track for neuroplastic alterations in the resting human brain: a transcranial direct current stimulation study. *Neuroimage* 2011;54(3):2287–96.
- Purpura D, McMurtry J. Intracellular activities and evoked potential changes during polarization of motor cortex. *J Neurophysiol* 1965;28:166–85.
- Rigonatti S, Boggio P, Mycowski M, Otta E, Fiquer J, Ribeiro R, et al. Transcranial direct current stimulation and fluoxetine for treatment of depression. *Eur Psychiatry* 2008;23:74–6.
- Rossi S, Hallett M, Rossini P, Pascual-Leone A, The Safety of TMS Consensus Group. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clin Neurophysiol* 2009;120(12):2008–39.
- Schambra HM, Abe M, Luckenbaugh D, Reis J, Krakauer JW, Cohen LG. Probing for hemispheric specialization for motor skill learning: a transcranial direct current stimulation study. *J Neurophysiol* 2011;106(2):652–61.
- Sparing R, Dafotakis M, Meister I, Thirugnanasambandam, Fink G. Enhancing language performance with non-invasive brain stimulation - A transcranial direct current stimulation study in healthy humans. *Neuropsychologia* 2008;46:261–8.
- 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.
- 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(6):565–9.
- Voon V, Fernagut P, Wickens J, Baunez C, Rodriguez M, Pavon N, et al. Chronic dopaminergic stimulation in Parkinson's disease: from dyskinesias to impulse control disorders. *Lancet Neurol* 2009;8(12):1140–9.
- Zaehle T, Sandmann P, Thorne J, Jancke L, Herrmann C. Transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex modulates working memory performance: combined behavioural and electrophysiological evidence. *BMC Neurosci* 2011;12(2).