

Université de Sherbrooke

**Évaluation de l'efficacité de l'application de la stimulation à courant direct sur  
l'apprentissage moteur des enfants ayant un trouble de l'acquisition de la  
coordination**

Par  
Haifa Akremi  
Programme Recherche en sciences de la santé

Mémoire présenté à la Faculté de médecine et des sciences de la santé  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)  
en sciences de la santé

Sherbrooke, Québec, Canada  
Juin 2017

Membres du jury d'évaluation  
Chantal Camden, PhD, directrice de recherche, Programme de recherche en sciences de  
la santé  
Hélène Corriveau, PhD, directrice de recherche, Programme de recherche en sciences de  
la santé  
Yannick Tousignant, PhD, membre interne, Programme de recherche en sciences de la  
santé  
Kevin Whittingstall, PhD, membre externe, Service de radiologie diagnostique,  
Université de Sherbrooke

© Haifa Akremi, 2017

# SOMMAIRE

## Évaluation de l'efficacité de l'application de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant un trouble de l'acquisition de la coordination

Par Haifa Akremi

Programmes de Recherche en sciences de la santé

Mémoire présenté à la Faculté de médecine et des sciences de la santé en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.) en sciences de la santé, Faculté de médecine et des sciences de la santé, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1H 5N4

**Introduction :** Les enfants ayant un trouble de l'acquisition de la coordination (TAC) éprouvent de la difficulté à apprendre des gestes moteurs, particulièrement ceux demandant de la coordination motrice. Des nombreuses études en neuroimagerie ont mis en évidence une diminution de l'activité neuronale au niveau du cervelet, ce qui pourrait être à l'origine des difficultés d'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC. Augmenter l'activité neuronale au niveau du cervelet afin d'améliorer l'apprentissage et la coordination motrice pourrait être une avenue prometteuse. La stimulation à courant direct (SCD) anodale permet d'augmenter l'activité neuronale de la région stimulée. L'application de la SCD anodale au niveau du cervelet a montré une amélioration de l'apprentissage moteur chez des populations en santé ou ayant des troubles neurologiques. À notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'efficacité de l'application de la SCD sur l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC. **Objectif :** Ce projet vise à évaluer l'efficacité de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet sur l'apprentissage moteur et la coordination motrice du membre supérieur des enfants ayant un TAC. **Méthodologie :** Une étude expérimentale à devis avant-après avec un groupe témoin équivalent a été réalisée. Dix-neuf enfants âgés entre 10 et 17 ans ont été randomisés dans un des deux groupes (stimulation active ou stimulation placebo). Durant trois sessions, les participants ont reçu un courant anodal (de 2mA ou placebo) au niveau du cervelet. La stimulation a été effectuée durant 20 minutes pendant que les enfants réalisaient simultanément une tâche de pianotage sur le clavier d'un ordinateur. Cette tâche, appelée « *Serial Reaction Time Task (SRTT)* », permet de mesurer la vitesse de réponse et le taux d'erreur, lesquels ont été utilisés pour évaluer l'apprentissage moteur. La coordination motrice du membre supérieur a été évaluée par le test doigt-nez (TDN) avant et après chaque application de la SCD. **Résultats :** L'application de la SCD n'a pas eu effet statistiquement significatif sur l'apprentissage moteur, bien qu'une tendance ait été observé quant à la réduction du taux d'erreur pour le groupe actif par rapport au groupe placebo ( $p=0.072$ ). Aucune différence statistiquement significative n'a été observée pour la vitesse de réponse et la coordination motrice entre les 2 groupes. **Conclusion :** La SCD anodale pourrait potentiellement améliorer l'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC, particulièrement en regard de la diminution du taux d'erreur. Cependant, plus de recherches sont nécessaires afin d'explorer si la SCD pourrait être un outil ayant un potentiel thérapeutique intéressant pour bonifier l'efficacité des interventions visant l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC.

**Mots clés :** Trouble de l'acquisition de la coordination, stimulation à courant direct, apprentissage moteur, coordination motrice, cervelet

# SUMMARY

## The efficacy of cerebellar transcranial direct current stimulation on motor learning for children with developmental coordination disorder

By

Haifa Akremi

Health sciences research Program

Thesis presented to the Faculty of medicine and health sciences for the obtention of the Master degree diploma for Master of Science (M.Sc.) in health sciences, Faculty of medicine and health sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1H 5N4

**Introduction:** Children with developmental coordination disorder (DCD) have difficulties learning motor tasks, especially for the ones requiring motor coordination. Numerous neuroimaging studies demonstrated a decrease in neuronal activity in the cerebellum, what might be responsible for motor learning difficulties in children with DCD. Increasing neuronal activity in the cerebellum might be an interesting avenue to improve learning and motor coordination. Anodal transcranial direct current stimulation (a-tDCS) has been shown to increase neuronal activity of the stimulated region, and to improve motor learning in healthy adults or patients with neurological disorders. To our knowledge, no study has assessed the tDCS effectiveness on motor learning for children with DCD. **Objective:** The present study evaluates the effect of cerebellar a-tDCS application on the motor learning and upper limb coordination of children with DCD. **Methods:** A pre-post experimental study with an equivalent control group was performed. Nineteen children aged 10-17 years were randomized in one of the two groups (active or placebo stimulation). During three sessions, participants received an anodal stimulation (2mA or placebo) on the cerebellum. The stimulation was carried out for 20 minutes while children simultaneously performed the Serial Reaction Time Task (SRTT), used to document motor learning through response speed and error rate. The motor coordination of the upper limb was evaluated by the finger-nose test (FNT) before and after each tDCS session. **Results:** The cerebellar a-tDCS could not significantly improve motor learning but a clinical reduction on error rate for the active group versus placebo group ( $p = 0.072$ ). The tDCS application did not show significantly improvement on speed and motor coordination between two groups. **Conclusion:** The a-tDCS could potentially improve motor learning by decreasing the error rate of children with DCD. However, more researches are needed to explore if the tDCS could be an interesting therapeutic tool to improve the effectiveness of motor learning interventions for children with DCD.

**Key words:** Developmental coordination disorder, transcranial direct current stimulation, motor learning, motor coordination, cerebellum.

## Table des matières

SOMMAIRE .....	i
SUMMARY .....	ii
Liste des tableaux .....	v
Liste des figures .....	vi
Liste des abréviations .....	vii
Remerciements .....	x
1. Chapitre 1 : Introduction .....	1
2. Chapitre 2 : Recension des écrits .....	4
2.1. Trouble de l'acquisition de la coordination.....	4
2.1.1. Définition et critères diagnostiques .....	4
2.1.2. Étiologie et physiopathologie du TAC .....	4
2.2. L'apprentissage moteur et la coordination motrice .....	6
2.2.1. Définition de l'apprentissage moteur .....	6
2.2.2. Neurophysiologie de l'apprentissage moteur .....	6
2.2.3. Types d'apprentissage moteur.....	7
2.2.4. Les phases d'apprentissage moteur .....	8
2.2.5. Évaluation de l'apprentissage moteur .....	8
2.2.6. Facteurs influençant l'apprentissage moteur .....	13
2.3. Les difficultés d'apprentissage moteur et de coordination motrice chez les enfants TAC.....	16
2.3.1. Les manifestations cliniques des difficultés d'apprentissage et de coordination .....	16
2.3.2. Activité neuronale au niveau du cervelet chez les enfants ayant un TAC.....	17
2.4. Les différents types d'intervention auprès des enfants ayant un TAC .....	19
2.5. La Stimulation à Courant Direct (SCD) .....	21
2.5.1. Définition et mode d'action de la SCD .....	21
2.5.2. Sécurité de l'application de la SCD auprès des enfants .....	22
2.5.3. Efficacité de la SCD sur l'apprentissage moteur.....	23
3. Chapitre 3 : Question de recherche, objectifs et les hypothèses de recherche .....	26
3.1. Question de recherche .....	26
3.2. Les objectifs de recherche .....	26
3.3. Hypothèses de recherche .....	26
4. Chapitre 4 : Méthodologie.....	27
4.1. Dispositif de recherche.....	27
4.2. Participants .....	27

4.3. Stratégie de recrutement et d'échantillonnage .....	30
4.4. Déroulement de l'étude .....	30
4.5. Randomisation.....	31
4.6. Variables et instruments .....	31
4.6.1. Variables de recrutement .....	31
4.6.2. Variables descriptives.....	32
4.6.3. Variable indépendante (l'intervention).....	33
4.6.4. Variables dépendantes .....	34
4.7. Calcul de la taille d'échantillon.....	36
4.8. Analyse statistique.....	36
4.9. Considérations éthiques.....	37
4.10. Procédures de sécurité et précautions lors de l'application de la SCD .....	37
5. Chapitre 5 : Résultats: Article scientifique .....	38
5.1. Résumé .....	39
5.2. Abstract .....	40
5.3. Manuscript.....	41
6. Chapitre 6 : Discussion .....	56
6.1. Apprentissage moteur : Taux d'erreur et vitesse de réaction .....	56
6.1.1. Taux d'erreur.....	56
6.1.2. Vitesse de réaction.....	70
6.1.3. Les facteurs combinés influençant l'apprentissage moteur et l'efficacité de la SCD chez les enfants ayant un TAC.....	72
6.2. Fonctionnement : Coordination motrice.....	73
6.3. Utilisation sécuritaire de la SCD .....	74
6.4. Influence des caractéristiques des participants.....	75
6.5. Limites et forces du projet de recherche.....	75
6.6. Perspectives futures du présent projet de recherche.....	76
Conclusion.....	56
Liste des références .....	79
Annexes .....	91

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Les facteurs influençants l'apprentissage moteur..... 15

**Article: Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation in Children with  
Developmental Coordination Disorder: A Randomized Sham-Controlled study**

Table 1 : Participants' characteristics..... 49

## Liste des figures

Figure 1 : Déroulement du projet de recherche.....	31
Figure 2 : Représentation schématique de l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet.....	34
Figure 3 : Tâche de pianotage « Serial Reaction Time Task » - SRTT .....	35

### **Article: Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation in Children with Developmental Coordination Disorder: A Randomized Sham-Controlled study**

Figure 1 : Flow Diagram illustrating enrollment of participants .....	44
Figure 2 : Study procedures and measures.....	48
Figure 3 : Results of motor learning on SRTT reaction time.....	50
Figure 4 : Results of motor learning on SRTT error rate .....	51
Figure 5 : Results of motor coordination on speed of FNT .....	52

## Liste des abréviations

APA	American Psychological Association
ADHD	Attention Deficit Hyperactivity Disorder
AQED	Association Québécoise pour les Enfants Dyspraxiques
CCI	Corrélation intra-classe
CHUS	Centre Hospitalier Universitaire de Sherbrooke
CO-OP	Cognitive Orientation to Daily Occupational Performance
CRE	Centre de Réadaptation Estrie
DCD	Developmental Coordination Disorder
EEG	ÉlectroEncéphaloGraphie
FORCE	Isometric Force Control Task
LTP	Long Term potentiation
MABC-2	Movement Assessment Battery for Children-2 <sup>ème</sup> edition
MCT	Mechanical Counter Test
NTT	Neuromotor Task Training
SARA	Assessment and Rating of Ataxia
SAQTAP	Sequential Finger Tapping Task
SCD	Stimulation à Courant Direct
SMT	Stimulation Magnétique Transcrânienne
SVIPT	Sequential Visual Isometric Pinch Task
PÉM	Potentiel Évoqué Moteur
Q-TAC	Questionnaire de Trouble de l'Acquisition de la Coordination
SRTT	Serial Reaction Task Time
TAC	Trouble de l'Acquisition de la Coordination
TDA/H	Trouble de Déficit d'Attention avec/ou sans Hyperactivité
TDCS	Transcranial Direct Current Stimulation
TEP	Tomographie par Émission de Positons
TDN	Test Doigt-Nez
PPT	Purdue Pegboard Test

*Je dédie ce travail à mes chers parents,  
ma source de force et de motivation.*

*La connaissance s'acquiert par l'expérience,  
tout le reste n'est que de l'information.  
-Albert Einstein-*

## Remerciements

Je remercie énormément mes directrices professeures Chantal Camden et Hélène Corriveau pour vos soutiens et votre écoute tout le long de ces deux années de maîtrise. J'en profiterais également pour remercier professeur Jean-François Lepage pour avoir pris le temps de m'aider et pour m'avoir soutenu dans les différentes étapes de mon projet. Vous m'avez énormément appris, vous côtoyez à renforcer ma motivation pour la recherche. Je vous suis reconnaissante pour tout le temps que vous m'avez consacré et tout l'aide que vous m'avez apporté.

Je tiens à remercier mes parents Samir Akremi et Omelkhir Hamrouni, qui ont toujours cru en moi, grâce à vous que je me rends là où je suis aujourd'hui. Que ce travail soit le témoignage de ma grande gratitude.

Je présente également mes remerciements à mes collègues du laboratoire GRAND-Réadaptation et au laboratoire de Pr Jean-François Lepage, ainsi que mes amis pour leurs soutiens tout le long de mes études.

Je remercie mes participants pour avoir accepté de participer au projet de recherche. Je souhaite également remercier la Mission Universitaire de Tunisie à Montréal pour la bourse d'étude et l'Université de Sherbrooke pour les fonds de recherche pour pouvoir réaliser ce projet.

## Chapitre 1 : Introduction

L'apprentissage moteur est indispensable pour améliorer la performance dans les activités demandant de la motricité, et ce, particulièrement pour les enfants qui sont en développement et vivent constamment de nouvelles expériences. Alors que l'apprentissage moteur semble se faire naturellement pour certains enfants, d'autres éprouvent des difficultés à apprendre de nouvelles tâches motrices. C'est notamment le cas des enfants qui ont un trouble de l'acquisition de la coordination (TAC). Le TAC est un trouble neurodéveloppemental caractérisé par des difficultés de coordination, d'apprentissage et d'exécution d'une séquence motrice (Rivard et al., 2014). Ces difficultés affectent significativement le fonctionnement de l'enfant (O'Dea et Connell, 2016). Le TAC est souvent décrit comme « un trouble hétérogène d'apprentissage moteur et de fonctionnement » (Ferguson, Jelsma et Versfeld, 2014). Étant donné la prévalence élevée de ce trouble, soit 5 à 6% des enfants d'âge scolaire (Zwicker, Missiuna, Harris et Boyd, 2012), et les conséquences importantes de celui-ci sur la vie de l'enfant, il est important d'explorer des alternatives thérapeutiques efficaces. L'évaluation d'un outil neurostimulateur a contribué à une amélioration significative de l'apprentissage moteur chez d'autres populations, tels que les adultes ayant un accident vasculaire-cérébrale (Kang, Summers et Cauraugh, 2016) et les enfants en bonne santé (Ciechanski et Kirton, 2016). Par conséquent, l'évaluation de cet outil neurostimulateur pourrait s'avérer une avenue intéressante pour remédier aux déficits d'apprentissage moteur et de coordination pour les enfants ayant un TAC.

Récemment, de nombreuses études ont été faites sur les techniques de neurostimulation, dont notamment sur la stimulation à courant direct (SCD) (Gandiga, Hummel et Cohen, 2006; Grimaldi *et al.*, 2014; Reis *et al.*, 2009; Stagg et Nitsche, 2014). La faisabilité, le caractère sécuritaire et l'effet modulateur de la SCD sur les différentes fonctions motrices et cognitives ont été documentées (Krishnan, Santos, Peterson et Ehinger, 2015; Nitsche et Paulus, 2000; Oberman et Enticott, 2015; Thibaut, Chatelle, Gosseries, Laureys et Bruno, 2013). La SCD a montré une amélioration de l'apprentissage moteur chez différentes populations saines et ayant des troubles neurologiques dont la neuropathophysiologie est semblable à celle du TAC, c'est-à-dire

où les difficultés de performance motrice semblent associées à une diminution de l'activité neuronale au niveau d'une région cérébrale ou cérébelleuse. Cependant, l'utilisation de la SCD chez les enfants ayant un TAC n'a jamais été explorée.

Cette étude vise à évaluer l'efficacité de l'application de la SCD sur l'apprentissage et la coordination motrice des enfants ayant un TAC. Tout d'abord, la recension des écrits présente les concepts de cette étude ainsi que les connaissances scientifiques les plus intéressantes afin de situer ce sujet de recherche par rapport aux études précédentes et ainsi mettre en évidence la pertinence de cette proposition. Puis, la méthodologie est brièvement présentée pour décrire les outils et les procédures de collecte des données. L'article scientifique présentant les résultats de l'étude est par la suite inclus, suivis d'une discussion comprenant des avenues pour des futures études.

## **Chapitre 2 : Recension des écrits**

Cette section inclut différentes sous-sections présentant les concepts sur lesquels repose cette étude. D'abord, la première section présente les caractéristiques et les critères diagnostiques du TAC et la physiopathologie du trouble. La deuxième section décrit le déficit d'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC. La troisième section présente les interventions thérapeutiques présentement utilisées auprès de ces enfants. Finalement, la dernière section décrit la technique de la stimulation à courant direct (SCD) ainsi que la justification de son utilisation pour améliorer l'apprentissage moteur auprès des enfants présentant un TAC.

### **2.1. Trouble de l'acquisition de la coordination**

#### **2.1.1. Définition et critères diagnostiques**

Le TAC, appelé également dyspraxie au Québec ou trouble développemental de la coordination depuis le DSM-V (2015), est défini comme un trouble neurodéveloppemental chronique affectant la motricité globale, la motricité fine, la posture, et les activités de la vie quotidienne, incluant la performance académique de l'enfant (Rivard *et al.*, 2014). Pour diagnostiquer le TAC chez l'enfant, celui-ci doit présenter les quatre critères diagnostiques établis par l'association américaine de psychiatrie (APA) (APA, 2015), soit avoir 1) une performance motrice dans les activités quotidiennes nettement inférieure à ce qui est attendu pour l'âge chronologique et le quotient intellectuel de l'enfant, 2) des difficultés de coordination affectant significativement la vie scolaire et sociale de l'enfant, 3) un début des symptômes qui survient dans la période précoce de développement, et 4) des difficultés motrices qui ne sont pas attribuables à une déficience intellectuelle ou visuelle, et qui ne sont pas liées à une maladie neurologique qui affecte le mouvement. Ces difficultés motrices que présentent l'enfant ayant un TAC persistent généralement jusqu'à l'âge adulte (APA, 2013). Le TAC est fréquemment présent en co-morbidité avec d'autres troubles neurodéveloppementaux, tels que le trouble du spectre de l'autisme (TSA), le trouble de

langage, et le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H) (APA, 2015). Ce dernier est le co-diagnostic le plus fréquent avec le TAC, avec une cooccurrence de 50% (APA, 2013).

Aux États-Unis, la prévalence du TAC est de 5 à 6% chez les enfants d'âge scolaire primaire (APA, 2015). Il est estimé que la prévalence du TAC est semblable au Canada (Dewey et Bernier, 2016), et que 1 à 2% des enfants présentent une forme sévère. Ces enfants présentent des difficultés de coordination et d'apprentissage très significatives qui affectent différentes sphères de la vie des enfants, incluant notamment la motricité fine et grossière, l'école, les loisirs et les relations sociales (O'Dea et Connell, 2016; Vaivre-Douret, 2007; Zwicker *et al.*, 2012). La prévalence du TAC signifie qu'environ 400 000 enfants au Canada sont touchés par ce trouble (Harris, Mickelson et Zwicker, 2015), dont 187 000 enfants d'âge scolaire primaire (Dewey et Bernier, 2016). Cette prévalence signifie qu'un à deux enfants par classe a un TAC. Ce trouble touche jusqu'à 7 fois plus les garçons que les filles du même âge (APA, 2015), bien que de récentes études populationnelles suggèrent que la prévalence chez les filles pourrait être sous-estimée. En effet, les filles ayant un TAC pourraient passer davantage inaperçue que chez les garçons puisqu'elles présentent généralement un niveau d'activité physique moindre que les garçons, que les attentes sur le plan moteur sont fréquemment plus élevées chez les garçons que chez les filles, et que les filles pourraient avoir des stratégies d'évitement des activités motrices différentes des garçons, ce qui contribueraient à retarder le processus de dépistage et d'identification du TAC (Cairney, Kwan, Hay et Faught, 2012).

### **2.1.2. Étiologie et physiopathologie du TAC**

Bien que l'étiologie précise du TAC soit inconnue, et donc qu'aucune cause n'a été formellement établi, plusieurs hypothèses au niveau des facteurs environnementaux et physiologiques ont été émises (APA, 2015; Gomez et Sirigu, 2015). Au niveau environnemental, certaines études notent que l'exposition du fœtus à l'alcool (APA, 2015; Rasmussen et Gillberg, 2000), l'hypoxie prénatale (Gomez et Sirigu, 2015), le petit poids de naissance (Holsti, Grunau et Whitfield, 2002) et la prématurité (Goyen et Lui, 2009) pourraient être des facteurs de risque du TAC (Edwards *et al.*, 2011). Ainsi, la présence des troubles de coordination pourrait être liée à un développement anormal

du système nerveux central, et certains auteurs croient qu'il pourrait y avoir une composante d'origine génétique (Mosca et al., 2016).

Des études récentes documentent les patrons d'activité cérébrale chez l'enfant TAC afin d'élucider les bases neurophysiologiques de ce trouble (Annexe *i*). Zwicker et ses collaborateurs (2010) ont mis en évidence, grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), que les enfants avec un TAC utilisent un réseau cérébral plus diffus que leurs pairs pour offrir une performance similaire ou moindre lors d'un exercice de traçage d'une ligne avec une seule main. Notamment, les enfants ayant un TAC ont davantage d'activité cérébrale au niveau du lobe pariétal inférieur gauche et du gyrus pramarginal droit, deux régions impliquées dans l'intégration de l'information sensorielle et des processus visuel et spatial (Zwicker et al., 2010). En contrepartie, une récente revue systématique rapporte une activité cérébrale moindre chez les enfants ayant un TAC comparé aux enfants ayant un développement typique dans plusieurs autres régions cérébrales (Brown-Lum et Zwicker, 2015). Plus spécifiquement, la diminution d'activité cérébrale est observée durant plusieurs tâches visuo-motrices effectuées durant l'IRMf, tels qu'une tâche séquentielle de pianotage, un « Go no-go Test » et le traçage rapide et précis d'une ligne. Ces diminutions sont notées au sein du cortex dorsolatéral préfrontal (Debrabant et al., 2013; Querne et al., 2008; Zwicker et al., 2011), dans l'hémisphère droit entre le striatum et le cortex pariétal inférieur (McLeod et al., 2014; Querne et al., 2008) et au niveau du cortex pariétal gauche (Kashiwagi et al., 2009). Ces résultats s'ajoutent aux observations antérieures d'une diminution de l'activité neuronale dans le réseau cérébelleux pendant une tâche séquentielle visuo-motrice, par exemple où l'enfant doit maintenir la manivelle et suivre la cible en déplaçant le curseur horizontalement sur un écran (Debrabant et al., 2013; Kashiwagi et al., 2009; Zwicker et al., 2011). Ces derniers résultats sont particulièrement intéressants pour comprendre l'origine des difficultés motrices de l'enfant ayant un TAC.

Les altérations au niveau du cervelet et du cortex pariétal et préfrontal seraient à l'origine des difficultés d'apprentissage, d'exécution, de contrôle et de coordination motrice des enfants ayant un TAC (Albaret et Chaix, 2012; Biotteau, Chaix et Albaret, 2016; Brown-Lum et Zwicker, 2015). Les études se poursuivent afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents aux difficultés d'apprentissage moteur et de

coordination motrice des enfants ayant un TAC. Pour ce faire, il est important de bien comprendre d'abord le concept et les processus neuronaux liés à l'apprentissage moteur et à la coordination motrice.

## **2.2. L'apprentissage moteur et la coordination motrice**

### **2.2.1. Définition de l'apprentissage moteur**

L'apprentissage moteur se caractérise par l'acquisition de nouveaux mouvements et par l'amélioration de la performance avec la pratique. Plus particulièrement, l'apprentissage moteur est défini comme un ensemble de processus associés à une pratique ou à une expérience menant à des changements relativement permanents de la performance et des habiletés (Schmidt et al., 2011). L'apprentissage moteur permet une amélioration dans le temps et l'espace de la précision des mouvements, et ce, grâce à la pratique répétée et aux interactions avec l'environnement (Willingham, 1998). L'acquisition de l'apprentissage moteur résulte d'un changement de l'activité neuronale au niveau de certaines structures cérébrales, ceci est lié à plusieurs phénomènes biochimique et physiologique lesquels seront décrits plus bas.

### **2.2.2. Neurophysiologie de l'apprentissage moteur**

L'apprentissage moteur implique l'activité de plusieurs régions cérébrales, chaque région étant responsable d'une fonction spécifique. Au niveau sous-cortical, le cervelet et les ganglions de base sont les deux structures principales impliquées dans l'apprentissage moteur (Ito, 2000). Le cervelet intervient dans l'apprentissage des nouveaux mouvements, et dans la planification du déroulement de l'action suivante pendant l'exécution du mouvement; son rôle est donc d'assurer un enchaînement progressif et coordonné des mouvements (Ito, 2000; Ramnani, Toni, Passingham et Haggard, 2001). Ceci résulte d'un processus chimique complexe, soit l'ouverture des canaux ionique  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  et la libération dans les cellules de Purkinje du glutamate, un neurotransmetteur qui déclenche un potentiel post-synaptique excitateur (Ito, 2000). L'activité des cellules de Purkinje et le déclenchement de ce potentiel post-synaptique entraînent une potentialisation à long terme LTP (Long Term Potentiation). La LTP jouerait possiblement un rôle important dans l'apprentissage moteur, alors que des

observations effectuées chez l'animal ont montré que le blocage de la LTP induit un trouble d'apprentissage (Ito, 2000).

D'autre part, les ganglions de base sont impliqués dans le processus d'apprentissage et de contrôle moteur (Doyon et al., 2009; Groenewegen, 2003). Plus spécifiquement, ils sont impliqués dans la phase d'initiation du mouvement, où l'activité du striatum augmente lors d'une tâche motrice séquentielle (Jin, Tecuapetla et Costa, 2014; Doyon, Owen, Petrides, Sziklas et Evans, 1996). Ainsi, Forssberg (1999) a constaté que les enfants ayant des maladies qui altèrent le fonctionnement des ganglions de la base, comme la paralysie cérébrale, présentent des difficultés d'apprentissage moteur. Étant donné le rôle des ganglions de la base et les difficultés des enfants ayant un TAC, plusieurs études suggèrent leur implication dans les troubles d'apprentissage d'une tâche motrice séquentielle et le contrôle de la force chez les enfants ayant un TAC (Bo et Lee, 2013; Gheysen, Van Waelvelde et Fias, 2011) mais aucune étude en neuroimagerie n'a confirmé cette hypothèse.

Afin de distinguer le rôle du cervelet et celui des ganglions de la base dans le processus d'apprentissage moteur, Lundy-Ekman et ses collègues (1991) ont observé que le cervelet est impliqué dans la performance et le contrôle moteur, soit respectivement dans la qualité et la capacité à ajuster, guider et organiser une tâche motrice volontaire afin d'assurer un mouvement stable (Latash, Scholz et Schöner, 2002) lors d'une tâche de pianotage. Ainsi, la rapidité à exécuter cette tâche s'est révélée affectée chez des enfants ayant un dysfonctionnement au niveau du cervelet. Grâce à une analyse réalisée sur des enfants ayant un dysfonctionnement au niveau des ganglions de base dans la même étude, Lundy-Ekman a montré que ces dernières structures sont impliquées dans le contrôle de la force isométrique (Lundy-ekman, Ivry, Keele et Woollacott, 1991).

La prochaine section présente les différents types et phases d'apprentissage moteur, ainsi que les tests qui peuvent être utilisés afin de les évaluer.

### **2.2.3. Types d'apprentissage moteur**

L'apprentissage moteur est composé de deux types, l'apprentissage moteur implicite et l'apprentissage moteur explicite (Honda *et al.*, 1998). Ces deux types d'apprentissage se distinguent par la conscience du participant de l'objectif de l'apprentissage pendant

l'exécution de la tâche motrice (Biotteau et al., 2016). Lors de l'apprentissage moteur implicite, le participant effectue sa tâche motrice sans avoir conscience de l'ordre des séquences motrices, de leur enchaînement, ou de l'objectif explicite de la pratique de l'exercice. Au contraire, au cours de l'apprentissage explicite, l'enfant connaît l'enchaînement de l'exercice et les objectifs à atteindre.

L'apprentissage moteur comporte deux catégories (Doyon et Benali, 2005), l'apprentissage séquentiel et l'adaptation motrice. Dans l'apprentissage séquentiel, l'enfant doit être capable de combiner des mouvements isolés de façon cohérente (Biotteau et al., 2016). L'apprentissage séquentiel est considéré comme un apprentissage implicite où l'enfant apprend la tâche motrice par la répétition des séquences; la tâche devient automatique et l'apprentissage se fait sans le contrôle de la conscience (Lejeune, Wansard, Geurten et Meulemans, 2014). L'adaptation motrice, quant à elle, consiste à la capacité de l'enfant à harmoniser une tâche visuo-motrice en lui créant des perturbations dynamiques ou des changements dans son environnement (comme l'apparition des stimulations visuelles perturbatrices sur l'écran de l'ordinateur), dans le but de réduire le nombre d'erreur résultant des perturbations (Biotteau et al., 2016; Shishov, Melzer et Bar-haim, 2017).

#### **2.2.4. Les phases d'apprentissage moteur**

L'apprentissage moteur est mesuré par une analyse des performances de trois phases distinctes (Biotteau et al., 2016) : l'acquisition, qui permet d'apprendre une nouvelle tâche; la rétention, qui est la capacité de maintenir le même niveau de performance motrice acquise pendant la phase d'acquisition du mouvement après une période où le mouvement n'a pas été pratiqué; et finalement, le transfert des capacités, qui permet d'adopter un exercice ou un mouvement similaire à la tâche apprise, avec une performance semblable. L'apprentissage moteur peut donc être évalué selon la performance motrice dans plusieurs tâches fonctionnelles, lors de diverses phases et selon différents types d'apprentissage ; ceci en utilisant différentes mesures neurophysiologiques reconnues.

#### **2.2.5. Évaluation de l'apprentissage moteur**

L'apprentissage moteur est un processus non observable, puisqu'il mène à des changements internes qui ne sont habituellement pas mesurables dans leur globalité,

mais certains changements (fonctionnels ou physiologiques) reliés à l'apprentissage moteur peuvent être observables (Schmidt et al. 2011). Plusieurs moyens d'évaluation de l'apprentissage moteur sont utilisés dans les milieux cliniques, en laboratoire, ou sur terrain. La mesure de l'apprentissage moteur se base généralement sur la quantification de l'évolution de la performance motrice au cours du temps (Schmidt, 1999). Dans ce sens, la courbe de performance est une des façons les plus utilisées pour évaluer le progrès sur le plan de l'apprentissage moteur (Schmidt, 1999). La courbe de performance est dessinée à partir de la moyenne des scores en fonction des essais afin de permettre à l'évaluateur de visualiser le progrès d'apprentissage d'un group. De façon générale de nombreuses mesures cliniques et neurophysiologiques sont communément utilisées dans les études expérimentaux pour quantifier et évaluer le niveau de changement de l'apprentissage moteur suite à une intervention. Parmi les nombreuses mesures disponibles nous présentons les principales en lien avec notre projet de recherche

### ***2.2.5.1. Les mesures neurophysiologiques***

L'acquisition de l'apprentissage moteur dépend des changements de l'excitabilité corticale (López-alonso, Cheeran et Fernández-del-olmo, 2015), particulièrement du phénomène neurophysiologique de LTP, décrit précédemment. L'excitabilité corticale, mesurée par les potentiels évoqués moteurs (PÉM), est une mesure neurophysiologique communément utilisée pour mesurer l'apprentissage moteur. Pour la mesure, la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) est fréquemment appliquée. Lors de son application, la SMT produit un champ magnétique qui passe sans atténuation au travers du crâne pour stimuler la région responsable des muscles de la main au cortex moteur primaire controlatéral. À travers la volée corticospinale, le courant induit une légère contraction musculaire involontaire enregistrée par électromyographie. Cette contraction est appelée PÉM. En maintenant l'intensité de stimulation constante (120% de l'intensité du seuil moteur selon le protocole standard (Pascual-Leone et al., 1995), les variations d'amplitude des PÉM nous renseignent sur l'excitabilité corticale, un marqueur robuste de l'apprentissage moteur (Pascual-Leone et al., 1995). Cette technique des PÉM s'est montrée sensible pour détecter les changements d'excitabilité corticale (Hermsen *et al.*, 2016; Ngomo, Leonard, Moffet et Mercier, 2012) sous diverses conditions, incluant l'apprentissage moteur (Lepage et al., 2012; Pascual-

Leone et al., 1995). Néanmoins, la fidélité de la mesure de l'excitabilité neuronale peut être influencée par plusieurs facteurs tels que le moment de la mesure dans la journée, la phase de cycle menstruel, la latéralité manuelle, la prise de caféine ou des psychostimulants.

#### **2.2.5.2. Les mesures cliniques**

Dans les études évaluant l'apprentissage moteur, les chercheurs ont utilisé plusieurs tâches fonctionnelles, dont les deux variables principales communes pour quantifier le changement au niveau de l'apprentissage sont la vitesse de réponse et le taux d'erreur. Ceci est appuyé par plusieurs auteurs tels que Maxwell et ses collègues (2001) notant que l'amélioration de l'apprentissage moteur implicite est marquée par la vitesse et la réduction des nombres d'erreur pendant la tâche. Dans ce sens, la SRTT « Serial Reaction Time Task » est une tâche séquentielle fréquemment utilisée pour évaluer l'apprentissage moteur implicite depuis 1987 (Nissen et Bullemer, 1987). Dans certaines tâches, l'instructeur questionne l'enfant pour savoir s'il a remarqué la répétition de la séquence afin de s'assurer du caractère implicite (Lejeune, Catale, Willems et Meulemans, 2013; Wilson, Maruff et Lum, 2003). Pour évaluer cette tâche, l'enfant place ses quatre derniers doigts d'une de ses mains sur le clavier d'un ordinateur. Suite à l'apparition d'un stimulus visuel sur l'écran, il doit appuyer de façon successive le plus rapidement possible sur le bouton du clavier correspondant. La vitesse de la réponse et le taux d'erreur sont les variables quantifiant l'apprentissage séquentiel (Nissen et Bullemer, 1987). Cette tâche a été utilisée pour mesurer le niveau de changement de l'apprentissage chez les adultes (Ferrucci et al., 2013; Kantak, Mummidisetty et Stinear, 2012; López-alonso et al., 2015; M. A. Nitsche et al., 2003a). Aussi, plusieurs auteurs ont utilisés la SRTT pour mesurer l'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC (Gheysen et al., 2011; Lejeune, Catale, Willems et Meulemans, 2013; Wilson, Maruff et Lum, 2003).

La SAQTAP «Sequential Finger Tapping Task» est une tâche similaire à la SRTT qui permet de quantifier l'apprentissage moteur (Saucedo Marquez, Zhang, Swinnen, Meesen et Wenderoth, 2013; Walker, Brakefield et Hobson, 2003). Elle consiste à appuyer le plus rapidement possible sur le bouton qui correspond au numéro qui apparaît dans une série de cinq chiffres, sur l'écran d'un ordinateur en utilisant les

quatre derniers doigts de la main. L'index de performance (IP) quantifie le taux d'apprentissage moteur calculé en fonction du taux d'erreur et de la vitesse de réponse :

$$IP = \frac{\% \text{ des réponses correctes}}{\text{Moyenne de temps des réponses pour chaque essai}}$$

La SVIPT "Sequential Visual Isometric Pinch Task" est une autre tâche permettant d'évaluer l'apprentissage moteur (Reis et al., 2009). Le participant doit contrôler le déplacement du curseur à l'écran en pinçant un transducteur de force avec le pouce et l'index. Le but est de déplacer le curseur le plus rapidement possible et avec précision entre une position initiale « HOME » et cinq portes affichées sur l'écran de l'ordinateur. Le niveau d'apprentissage est évalué selon les mesures de la vitesse de la réponse et selon le taux d'erreur. Reis et ses collègues (2009) ont développé ce modèle pour évaluer la performance motrice :

$$a = \frac{1 - \text{taux d'erreur}}{\text{taux d'erreur}(\text{Ln}(\text{Durée de réponses}) * \text{Ln}(\text{Durée de réponses}))'}$$

La FORCE "Isometric Force Control Task" est une tâche modifiée à partir de la SVIPT, où le participant contrôle la force du transducteur en tenant le curseur entre le pouce et l'index de la main non dominante. Le participant doit déplacer le curseur le plus précisément possible entre la position 0 « Home » et les neuf autres zones dans un ordre déterminé. La FORCE et la SVIPT ont été utilisées pour quantifier l'apprentissage dans plusieurs études (Reis et al., 2009; Saucedo Marquez et al., 2013; Schambra et al., 2011). Marquez et ses collègues ont comparé l'effet de pratique de la SAQTAP par rapport à la SVIPT sur l'apprentissage moteur suite à l'application de la SCD, montrant que la pratique de la SAQTAP résulte en une meilleure acquisition de l'apprentissage moteur alors que la SVIPT montre une amélioration au niveau de la rétention (Saucedo Marquez et al., 2013).

En plus, plusieurs autres tests évaluant l'apprentissage et la performance motrice des enfants ayant un TAC ont été utilisés dans diverses études. Par exemple, dans l'exercice de traçage d'un trait, l'enfant utilise une manette liée à un ordinateur pour tracer le plus précisément possible une ligne entre deux lignes sur un schéma (sans croiser les 2 lignes); le nombre des tracés, le temps de traçage et le taux d'erreur sont les trois

variables quantifiant la performance motrice (Zwicker et al., 2010; 2011). De même, le Jebsen Taylor Hand Function est un exercice de pianotage uni-manuel pour évaluer la performance motrice dans les activités de la vie quotidienne (Jebsen et al., 1969). Cet exercice est semblable à la SRTT; l'enfant doit appuyer le plus rapidement et précisément possible sur la lettre qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur avec le bouton qui correspond sur le clavier (soit A, S, D ou F). Le temps de réaction et le taux d'erreur sont les variables évaluant l'apprentissage moteur (Ciechanski et Kirton, 2016). Le Purdue Pegboard Test (Tiffin and Asher, 1948), composé de 4 sous-tests, est utilisé pour évaluer l'apprentissage moteur explicite. Les participants doivent placer des goupilles dans une planche avec la main droite, la main gauche ou les deux (Ciechanski et Kirton, 2016). D'autres chercheurs évaluent la fonction motrice dans sa globalité (la planification, l'exécution, l'apprentissage et le contrôle moteur) avec des exercices physiques complexes tels que le cyclisme et les exercices aérobiques, en considérant plusieurs paramètres tels que la force musculaire, l'endurance et la coordination. Ces exercices ne ciblent cependant pas seulement l'apprentissage moteur; ils sont utilisés principalement pour des populations ayant des troubles neurologiques affectant la fonction motrice, tel que le Parkinson (Nadeau, Lungu et Duchesne, 2017). En plus, Purtsi et ses collègues ont conclu que l'exercice de cyclisme ergonomique ne permet pas d'évaluer le niveau d'apprentissage moteur après avoir trouvé des résultats négatifs chez les personnes âgées (Purtsi, Vihko, Kankaanpää et Havas, 2012). Bien que l'apprentissage moteur ne puisse être évalué via ces tâches, elles peuvent néanmoins renseigner sur la fonction motrice. De même, d'autres tâches plus spécifiques pourraient possiblement aider à évaluer les retombées fonctionnelles liées à l'amélioration de l'apprentissage moteur. Des tâches spécifiques de coordination pourraient permettre d'évaluer les changements sur le plan de la coordination qui pourraient résulter d'un apprentissage moteur. Le test doigt-nez (TDN), où le sujet doit toucher le plus rapidement et précisément possible son nez avec le bout de l'index (Schmitz, 2001), est un exemple de test qui pourrait être utilisé à cette fin. Toutefois, les caractéristiques de pratique de l'exercice soit d'une façon continue ou discontinue, l'exercice doit être composé par des séries en blocs ou randomisés et les caractéristiques personnelles du sujet peuvent influencer grandement l'apprentissage moteur. Ces facteurs sont distingués et choisis selon les caractéristiques de la personne (tel que la présence d'un trouble, son âge etc) ainsi que le but de la pratique. Ces facteurs sont détaillés ci-bas.

### 2.2.6. Facteurs influençant l'apprentissage moteur

L'apprentissage moteur est influencé par plusieurs facteurs (Schmidt et Lee, 2011) sur lesquels il est possible d'intervenir afin de maximiser l'apprentissage moteur. Ces facteurs sont pris en considération dans les approches thérapeutiques visant l'amélioration de l'apprentissage moteur chez la population pédiatrique (Levac, Wishart, Missiuna, Ont et Wright, 2011). Le tableau ci-bas récapitule les facteurs. Ils incluent :

- *Les caractéristiques personnelles du participant*, telles que la motivation et l'intention à pratiquer la tâche motrice, ainsi que l'attention et la capacité à assimiler les instructions les plus importantes pour réussir la tâche (Dweck et Leggett, 1988; Schmidt et Lee, 2011). En ce sens, un enjeu avec les enfants peut être relié à leurs capacités d'attention et à mémoriser les instructions pour réaliser une tâche demandée, lesquelles sont plus faibles que chez les adultes (Schmidt et Lee, 2011). Pour contrôler ce critère, l'instructeur doit décrire explicitement les actions essentielles et vérifier l'assimilation de ces actions par le participant lors du premier essai (Schmidt et Lee, 2011). Plusieurs caractéristiques du participant (tels que sa motivation et sa capacité à assimiler les instructions) ne sont généralement pas pris en compte dans les études évaluant le niveau d'apprentissage moteur chez les enfants (Biotteau, Chaix et Albaret, 2016; Gheysen *et al.*, 2011; Lejeune, Wansard, Geurten et Meulemans, 2014), car ils sont difficilement quantifiables en réadaptation pédiatrique. La non-considération ou l'absence d'information sur ces facteurs personnels représentent une limite de plusieurs études en pédiatrie, puisque ces facteurs peuvent biaiser la réponse à l'intervention entre les participants.
- *Les caractéristiques spécifiques à la tâche motrice* influencent également l'apprentissage moteur. Elles se résument en trois classes : Premièrement le mode de pratique de la tâche demandée (i.e. pratiquer à divers brefs moments ou de façon continue sur une plus longue période de temps); deuxièmement la pratique d'une partie de la tâche ou de la tâche en entier à la fois; troisièmement le type de tâche, qu'elle soit composée par des séries effectuées en bloc (la présentation des séries qui se répètent successivement en ordre) ou d'une façon randomisée (la présentation des différentes séries aléatoirement). Les caractéristiques spécifiques à la tâche sont sélectionnées selon le but de l'apprentissage moteur soit à long terme

ou à court terme, la phase d'apprentissage visée (soit l'acquisition, la rétention ou le transfert) et la population à l'étude. Par exemple, pour le but de la pratique, les exercices en blocs ont montré une meilleure rétention de l'apprentissage moteur à court terme alors que les séries randomisées sont meilleures pour la rétention à long terme (Immink et Wright, 2001). En outre, la pratique des exercices répétitifs en blocs facilite la mémorisation et réduit l'effort cognitif destiné pour apprendre les détails de la tâche effectuée (Immink et Wright, 2001). On peut choisir le type de tâche selon la phase d'apprentissage visée, par exemple la mesure de l'exécution motrice se révèle meilleure en utilisant le type randomisé que par blocs durant la phase d'acquisition (Lage *et al.*, 2015). Ces constatations pourraient être liées à un niveau d'activation neuronale plus élevé dans plusieurs régions impliquées dans l'exécution et la planification motrice tel que le M1 lors de la pratique des exercices randomisés que des exercices répétitifs en blocs, lors de la phase d'acquisition et un effet contraire est observé lors de la phase de rétention (Lage *et al.*, 2015). Ainsi, une amélioration de l'acquisition de l'apprentissage est liée à un meilleur engagement cognitif du participant lors de la pratique des exercices randomisés que par blocs (Lage *et al.*, 2015). De plus, il semblerait que la pratique de la tâche d'une façon discontinue serait plus efficace pour améliorer l'apprentissage des populations qui sont plus exposées à la fatigue (ex. les participants ayant un accident vasculaire cérébral), puisque ce rythme leur permet de prendre plus de temps de récupération (Schmidt et Lee, 2011). Considérant notre population, selon les études antérieures qui ont exploré l'apprentissage moteur, les enfants ayant un TAC peuvent pratiquer des exercices en blocs et d'une façon continue (Lejeune *et al.*, 2013; Wilson *et al.*, 2003), ou en prenant une pause entre les blocs (Gheysen *et al.*, 2011) lors d'une tâche visuo-motrice « SRTT ».

- *Le feedback ou la guidance* offerte par le clinicien durant la pratique peut influencer l'apprentissage moteur. La démonstration de la tâche à pratiquer semblerait particulièrement efficace pendant les premiers essais (Schmidt et Lee, 2011), lorsque l'enfant n'est pas familiarisé avec la tâche demandée. Cette stratégie permettrait de diminuer le taux d'erreur et contribuerait donc à un apprentissage plus rapide, particulièrement pour les tâches fonctionnelles effectuées à l'aide d'un ordinateur ou un robot (Schmidt et Lee, 2011; Masters, 2000). D'autre part, le

feedback est un des principes fondamentaux influençant l'apprentissage moteur. Le feedback peut être donné en cours ou après la pratique et il permet de préciser la nature du mouvement demandé, ou de renseigner le participant sur ses résultats. Le feedback peut également être kinesthésique et dans ce cas a pour but de renseigner l'enfant sur certains paramètres d'exécution de la tâche motrice tel que la vitesse, le temps, la position des membres, etc. Plusieurs auteurs déduisent que le feedback kinesthésique facilite l'apprentissage et la performance motrice lorsque l'enfant reçoit des démonstrations donné par le clinicien qui lui permet de comprendre ses erreurs et mieux réussir sa tâche (Levac *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2011). Le feedback peut être verbal, sous formes des remarques et des indices verbaux données par l'évaluateur renseigner l'enfant sur les instructions d'exécution, son score après la tâche etc. Le feedback verbal permet d'améliorer la rétroaction de l'enfant et guider l'exécution de sa tâche (Levac *et al.*, 2011). Le feedback peut être visuel, par exemple par l'affichage des commentaires sur l'écran de l'ordinateur pendant l'exécution de la tâche ou l'apparition de signaux visuels en couleur pour indiquer la réussite ou l'échec de la pratique. Le feedback visuel est connu comme étant le feedback sensoriel le plus efficace pour soutenir l'apprentissage chez des personnes en bonne santé (Adams, Gopher et Lintern, 1975).

Le tableau 1 présente une synthèse des différents facteurs influençant l'apprentissage moteur ainsi que des exemples pratiques illustrant comment ces facteurs peuvent être pris en considération lors de l'enseignement de tâches motrices.

*Tableau 1 : Les facteurs influençants l'apprentissage moteur*

Facteurs	Sous-facteurs / catégories	Prise en considération des facteurs affectant la motivation lors des interventions
Les caractéristiques personnelles du participant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La motivation et l'intention à pratiquer la tâche</li> </ul>	L'instructeur doit décrire explicitement les actions essentielles et vérifier l'assimilation de ces actions par le participant lors du premier essai
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'attention et la capacité à assimiler les instructions</li> </ul>	

Les caractéristiques de pratique de la tâche motrice	Le mode de pratique de la tâche, soit une pratique de façon: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Discontinue</li> <li>• Continue</li> </ul>	La pratique de la tâche d'une façon discontinue serait plus efficace pour améliorer l'apprentissage des populations qui sont plus exposées à la fatigue
	La pratique : <ul style="list-style-type: none"> <li>• D'une partie de la tâche</li> <li>• De la tâche en entier</li> </ul>	Ceci peut donner des résultats variables d'une pratique à l'autre et entre individus
	Le type de de la tâche : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des séries en bloc</li> <li>• Randomisée</li> </ul>	Le type de l'exercice est choisi selon le but de la pratique :  Les tâches en blocs ont montré une meilleure rétention de l'apprentissage moteur à court terme alors que les séries randomisées sont meilleures pour la rétention à long terme
L'assistance ou la guidance offerte par le clinicien	Feedback peut être donné : <ul style="list-style-type: none"> <li>• En cours</li> <li>• Après la pratique</li> </ul>	L'enfant reçoit des instructions pour se corriger et mieux réussir sa tâche
	Feedback peut être: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinématique</li> <li>• Verbale</li> <li>• Visuel</li> </ul>	Renseigner l'enfant sur certains paramètres d'exécution de la tâche motrice tel que la vitesse, le temps, la position des membres, etc.

## 2.3. Les difficultés d'apprentissage moteur et de coordination motrice chez les enfants TAC

### 2.3.1. Les manifestations cliniques des difficultés d'apprentissage et de coordination

Les difficultés de coordination et d'apprentissage moteur des enfants qui ont un TAC se traduisent par une lenteur d'exécution des mouvements dans la vie quotidienne (Biotteau *et al.*, 2016), par une difficulté d'apprendre des nouvelles tâches motrices (Lejeune *et al.*, 2013) et par la nécessité de pratiquer davantage avant de réussir une tâche motrice (Zwicker *et al.*, 2010).

Malgré l'importance des répercussions des difficultés d'apprentissage moteur sur la vie scolaire et sociale de l'enfant ayant un TAC, relativement peu d'études ont décrit ces difficultés dans les différentes phases d'apprentissage (l'acquisition, la rétention et le transfert des habiletés) (Biotteau *et al.*, 2016). Similairement, peu d'études ont proposé de nouvelles solutions pour améliorer l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC (Biotteau *et al.*, 2016). Récemment, deux études ont rapporté que les enfants ayant un TAC ont des gestes moteurs moins précis notamment lors de la réalisation de la tâche de pianotage sur le clavier de l'ordinateur (SRTT), (par exemple l'enfant n'appuie pas sur le bouton qui correspond au stimulus apparu sur l'écran de l'ordinateur), et plus lents que leurs pairs (Biotteau, Chaix et Albaret, 2015; Lejeune *et al.*, 2014). Ces résultats antérieurs montrent que les enfants ayant un TAC ont besoin de plus de pratique pour arriver au même niveau de performance motrice que les enfants en bonne santé de même âge et ce, pour toutes les trois phases de l'apprentissage moteur (Biotteau *et al.*, 2016). La phase d'acquisition d'une tâche motrice est plus longue et nécessite plusieurs répétitions chez les enfants qui ont un TAC, ce qui s'expliquerait par un déficit au niveau du processus d'automatisation, de l'exécution et du contrôle moteur (Biotteau *et al.*, 2016).

Les difficultés d'apprentissage et d'exécution motrice chez les enfants ayant un TAC pourraient s'expliquer par divers mécanismes liés à l'apprentissage et au contrôle moteur qui seraient déficitaires chez cette population. Notamment, l'ajustement spatio-temporel des mouvements pour atteindre la cible serait perturbé chez les enfants qui ont un TAC, et ils semblent avoir des problèmes à développer de nouveaux modèles internes pour l'exécution des tâches motrices au cours des essais répétés (Smits-Engelsman *et al.*, 2003; Wilson *et al.*, 2001). Ainsi, les enfants ayant un TAC auraient des problèmes au niveau de la planification et de l'exécution motrice (Shelley A. Goodgold-Edwards, 1990) mais également au niveau de la représentation (ex. visio-spatial et perceptuel), de l'organisation et de la séquence (Gheysen *et al.*, 2011; Kagerer, Bo, Contreras-Vidal et Clark, 2004).

### **2.3.2. Activité neuronale au niveau du cervelet chez les enfants ayant un TAC**

Dans les recensions des écrits consultés, le cervelet figure parmi les structures les plus souvent nommées comment ayant un rôle à jouer dans les difficultés motrices des

enfants ayant un TAC (Brown-Lum et Zwicker, 2015; Wilson et al., 2003). En effet, il a un rôle important dans la fonction motrice, particulièrement dans la planification et l'exécution d'une tâche motrice, la mémoire de travail, la coordination et le contrôle moteur (Halloran et al., 2016), ainsi que dans l'apprentissage moteur (Ito, 2000; Thach, 1998), spécifiquement dans l'apprentissage séquentiel (Doyon et Benali, 2005; Joseph M. Galea, Vazquez, Pasricha, Orban De Xivry et Celnik, 2011; Ito, 2000). Ce type d'apprentissage permet d'améliorer les performances dans les tâches motrices au quotidien, puisque celles-ci sont automatisées, c'est-à-dire que l'exécution peut s'améliorer sans que la conscience intervienne (Halloran et al., 2016). Ces processus d'apprentissage séquentiel et d'automatisation sont déficitaires chez les enfants ayant un TAC (Biotteau et al., 2016). Ces fonctions reposent en grande partie sur le cervelet, plus spécifiquement sur les régions cérébelleuses postérieures, dont le « crus I », le lobule VI et le lobule IX, qui sont altérées de façon importante dans le TAC (Debrabant et al., 2013, Zwicker et al., 2011). Ces régions présentent une diminution de l'activité neuronale chez les enfants ayant un TAC par rapport à leurs pairs (Debrabant et al., 2013, Zwicker et al., 2011). Cette diminution de l'activité cérébelleuse est particulièrement intéressante considérant le rôle du cervelet dans la performance motrice. Le cervelet est particulièrement impliqué dans l'acquisition et la précision du mouvement (Cantarero et al., 2015), dans la programmation de l'acte et la coordination motrice (Vuillier, Medeiros De Bustos et Tatu, 2011) ainsi que dans la rétention (Zwicker et al., 2011). Le cervelet est donc impliqué dans l'apprentissage moteur dans sa globalité (Celnik, 2015; Ito, 2000).

En résumé, bien que les études antérieures ont identifié plusieurs structures qui peuvent être responsables sur les difficultés motrices liées à un TAC, maintes études rapportent des diminutions de l'activité neuronale au niveau du cervelet et certains lobes cérébraux (Debrabant *et al.*, 2015; Querne *et al.*, 2008; Zwicker *et al.*, 2010, 2011). Aucune méta-analyse ou recension systématique n'a été faite à ce sujet, mais la littérature semble suggérer que le cervelet pourrait être une structure centrale en lien avec les troubles d'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC, puisqu'il est impliqué de façon importante dans l'apprentissage et la coordination (Debrabant et al., 2013; Zwicker et al., 2010, 2011). Cette hypothèse de travail nous a amené à explorer différentes possibilités de traitement pouvant agir directement sur l'activité du cervelet,

dans le but d'améliorer l'apprentissage moteur et, subséquemment, la coordination motrice chez les enfants ayant un TAC. Il s'agirait d'une première stratégie thérapeutique qui viserait directement les mécanismes en cause, alors que les interventions actuelles visent d'avantage à soutenir l'enfant et son entourage afin de favoriser la réalisation des activités.

## **2.4. Les différents types d'intervention auprès des enfants ayant un TAC**

Plusieurs stratégies thérapeutiques sont utilisées en milieu clinique pour améliorer les fonctions motrices et cognitives de l'enfant ayant un TAC. Au niveau de la performance motrice, les meilleures pratiques cliniques actuelles visent à favoriser le développement des stratégies cognitivo-comportementales pour compenser les déficits au niveau de l'apprentissage moteur (Biotteau *et al.*, 2016; Schoemaker et Smits-engelsman, 2015; Bouwien C M Smits-Engelsman *et al.*, 2013). A titre d'exemple, le NTT (neuromotor task training) est une approche utilisée dans le cadre des stratégies cognitivo-comportementales. Cette approche consiste à guider l'enfant durant ces différentes phases d'exécution de la tâche motrice demandée pour compenser ses déficits en l'encourageant par des indices verbaux (Schoemaker et Smits-engelsman, 2015). Le feedback reçu par le thérapeute motive l'enfant et l'encourage à continuer à pratiquer pour améliorer sa performance et donc son apprentissage. Cette stratégie est parmi les plus efficaces pour améliorer l'acquisition des tâches motrices, tel que l'écriture manuscrite (Jongmans, Linthorst-bakker, Westenberg et Smits-engelsman, 2003). Plus généralement, les stratégies dites « Top Down », soit celles ciblant davantage la réalisation de tâches fonctionnelles, sont parmi les plus efficaces. Celles-ci incluent les approches centrées sur la tâche et les approches cognitives (Smits-Engelsman *et al.*, 2013). L'approche CO-OP (Cognitive Orientation to daily Occupational Performance) est quant à elle un exemple d'une approche cognitive centrée sur la tâche de style « Top-Down ». L'approche CO-OP permet de guider l'enfant pour qu'il corrige lui-même ses erreurs, analyse la cause d'échec de la tâche, puis élabore un plan pour une meilleure exécution, ce qui lui permet de corriger et améliorer ses performances par lui-même (Schoemaker et Smits-engelsman, 2015). Cette approche utilise donc l'apprentissage moteur explicite où l'enfant a comme

objectif clair d'apprendre la tâche et de la réaliser convenablement. Ces approches ont montré de bons résultats pour améliorer les performances motrices de l'enfant ayant un TAC (Bouwien C M Smits-Engelsman *et al.*, 2013). Les approches utilisées permettent de guider l'enfant en utilisant du feedback interne ou externe, ou des indices verbaux. Ces approches favorisent ainsi à l'enfant de développer des stratégies cognitives compensatrices pour améliorer l'exécution des tâches motrices.

En résumé, le but des approches d'intervention du TAC est de soutenir l'enfant et son entourage afin qu'ils développent des stratégies cognitivo-comportementales pour améliorer la fonction motrice et prévenir les conséquences secondaires, telles que l'évitement d'activité et le développement des problèmes de santé physique ou mentale (O'Dea et Connell, 2016). Les approches d'intervention actuelles apparaissent donc orientées vers la diminution des symptômes du trouble en ciblant peu la neuropathophysiologie de la condition. Il est plausible qu'une intervention visant à modifier non pas les manifestations cliniques mais bien les mécanismes impliqués causalement dans l'apparition de ceux-ci permettrait de modifier de façon tangible et efficace le cours de ce trouble.

Puisqu'une des hypothèses dominantes expliquant les difficultés des enfants ayant un TAC est la diminution de l'activité du réseau neuronal au niveau du cervelet (Debrabant *et al.*, 2013; Zwicker *et al.*, 2010; 2011), certains auteurs ont recommandé l'utilisation d'interventions visant à augmenter l'activité neuronale au sein de ces structures déficitaires pour le TAC (Brown-Lum et Zwicker, 2015). Des nombreux outils de neurostimulation ont été utilisés depuis des années afin de moduler l'activité neuronale (Krishnan *et al.*, 2015; Thibaut *et al.*, 2013). Une des façons sécuritaire pour augmenter l'activité neuronale au niveau du cervelet est l'utilisation des techniques de neurostimulation de la SCD, grâce à son effet neuromodulateur (Nitsche et Paulus, 2000). D'ailleurs, des études récentes montrent que la SCD peut être utilisée pour améliorer l'apprentissage moteur chez des adultes en santé (Cantarero *et al.*, 2015; Ferrucci *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2009) tout comme chez des patients ayant des troubles neurologiques (Boggio *et al.*, 2006; Hummel *et al.*, 2005). Nous estimons que son application pourrait également faciliter l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC. Dans cette prochaine section, son mode d'action et son efficacité sur l'apprentissage moteur chez différentes populations sont détaillés.

## 2.5. La Stimulation à Courant Direct (SCD)

### 2.5.1. Définition et mode d'action de la SCD

La SCD est une technique modulatrice de l'activité neuronale de la région cérébrale stimulée qui fournit un courant de faible intensité (de 1 à 2 mA) à travers deux électrodes placées sur le cuir chevelu et reliées à une source électrique. L'efficacité de la SCD pour induire des modifications de l'activité neuronale a été confirmée à l'aide de plusieurs outils de neuroimagerie, dont la Tomographie par Émission de Positons (TEP), l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), l'Électroencéphalographie (EEG) et la Stimulation Magnétique Transcrânienne (SMT) (Thibaut, Chatelle, Gosseries, Laureys et Bruno, 2013). L'effet neuromodulateur de la SCD est le résultat de processus chimiques et électrophysiologiques complexes, lesquels sont encore mal compris. Parmi les hypothèses principales, notons la polarisation de la membrane neuronale (Bikson *et al.*, 2004), la modification des mécanismes glutamatergiques et GABAergiques (Kim, Stephenson, Morris et Jackson, 2014) et l'augmentation de production protéique, notamment du facteur neurotrophique issu du cerveau (*Brain-derived neurotrophic factor*, BDNF) (Podda *et al.*, 2016). Tous ces éléments contribuent favorablement à l'augmentation et au maintien de signaux entre les neurones, augmentant par le fait même la plasticité synaptique via la potentialisation à long terme (LTP). L'amélioration de l'apprentissage moteur est marquée par le maintien de la LTP (Fritsch *et al.*, 2010).

Plusieurs revues soulignent que les effets neuromodulateurs de la SCD peuvent engendrer des effets bénéfiques sur la motricité, la douleur (effet antalgique), la mémoire, le langage et la dépression (Thibaut *et al.*, 2013), ainsi que sur le contrôle moteur, l'apprentissage cognitif et le contrôle émotionnel (Ferrucci et Priori, 2014; Reis et Fritsch, 2011). L'augmentation ou la diminution de l'activité neuronale de la région stimulée dépend de la polarité délivrée par la SCD. L'anode est excitatrice, elle entraîne une hyperexcitabilité neuronale c'est-à-dire qu'elle augmente abaisse le seuil de dépolarisation du neurone, facilitant ainsi le potentiel d'action, alors que la cathode est inhibitrice, ce qui signifie qu'elle augmente le seuil de décharge et induit ainsi une hypoexcitabilité neuronale (Nitsche et Paulus, 2000).

### **2.5.2. Sécurité de l'application de la SCD auprès des enfants**

L'application de la SCD est reconnue sécuritaire, dans la mesure où certaines conditions d'application sont respectées (Woods et al., 2015) (ex. si l'intensité du courant ne dépasse pas 4 mA). Plusieurs articles ont documenté les effets indésirables engendrés suite à l'application de la SCD chez les adultes en santé (Fertonani, Ferrari et Miniussi, 2015), chez les adultes atteints de troubles (Poreisz, Boros, Antal et Paulus, 2007), et récemment chez les adolescents et les enfants (Krishnan, Santos, Peterson et Ehinger, 2015). Les effets secondaires suite à l'application de la SCD sont légers, transitoires et de courtes durées, et aucun événement indésirable important n'a été rapporté à ce jour chez l'enfant (Krishnan et al., 2015). Dans une méta-analyse incluant plus de 500 enfants (âgés entre 2,5 et 17,8 ans), Krishnan et collaborateurs rapportent que les effets secondaires principaux sont bénins, et consistent majoritairement à des picotements (11,5 %), des démangeaisons (5,8 %), une rougeur aux sites de stimulation (4,7 %) et une sensation d'inconfort au cuir chevelu (3,1 %). Des événements plus rares ont aussi été rapportés, dont des maux de tête légers (Moliadze et al., 2015), un changement d'humeur, une douleur au cou ou au crâne (Guarienti et al., 2015; Krishnan et al., 2015), ainsi qu'une fatigue modérée (Fertonani et al., 2015; Guarienti et al., 2015; Moliadze et al., 2015). Ces effets secondaires peuvent être modulés selon les paramètres appliqués lors de la SCD (l'intensité, la durée, la surface des électrodes, la densité du courant...) (Fertonani et al., 2015; Woods et al., 2015). Il est important de noter que plusieurs de ces effets secondaires sont aussi présents lors de la stimulation placebo (sans courant actif), et ce, dans une fréquence similaire à la stimulation active, notamment en ce qui concerne les maux de tête, la fatigue, les changements d'humeur (Krishnan et al., 2015). Ces effets secondaires s'estompent dans les deux heures suivant la stimulation et aucun effet à retardement n'a été rapporté (Krishnan et al., 2015). La SCD est très bien tolérée chez les enfants en bonne santé ou ayant des troubles neurologiques âgés entre 10 et 17 ans avec les mêmes paramètres lors de l'application de la SCD chez les adultes (intensité de 1 à 2mA pendant 20 à 30 minutes) (Palm et al., 2015). Puisque la SCD est documentée comme étant sécuritaire, des études pourraient explorer son potentiel comme traitement ou outil expérimental auprès de la population pédiatrique (Moliadze et al., 2015), notamment les enfants ayant des troubles

neurodéveloppementaux (Oberman et Enticott, 2015), et en particulier pour les enfants ayant un TAC.

### **2.5.3. Efficacité de la SCD sur l'apprentissage moteur**

La SCD a montré des effets bénéfiques sur l'apprentissage moteur suite à la stimulation du cervelet (Ferrucci et Priori, 2014) et du cortex moteur primaire (Hashemirad, Zoghi, Fitzgerald et Jaberzadeh, 2016) chez les personnes en bonne santé (Cantarero et al., 2015; Hashemirad et al., 2016; Reis et Fritsch, 2011), soit des enfants (Ciechanski et Kirton, 2016), des adultes (Ferrucci et al., 2013) et des personnes âgées (Hardwick et Celnik, 2014) ainsi que la population ayant des troubles neurologiques notamment les personnes ayant un accident vasculaire cérébrale (AVC) (Buch et al., 2017; Figlewski et al., 2017).

#### ***2.5.3.1. Efficacité de la SCD appliquée au niveau du cortex moteur primaire***

Plusieurs chercheurs ont évalué l'efficacité de la SCD appliqué au niveau du cortex moteur primaire (M1) chez les adultes sains. Reis et ses collègues (2009) ont montré que cinq séances d'application de la SCD anodale de 1mA pendant 20 minutes, a amélioré de façon significative l'acquisition et la rétention de l'apprentissage moteur (après trois mois) testé sur 24 participants adultes en bonne santé. L'évolution du changement de l'apprentissage moteur est mesurée à l'aide d'une tâche séquentielle visuelle de pincement isométrique (SVIPT). Des études comparables, avec 26 participants (Saucedo Marquez *et al.*, 2013) et 34 participants (Reis *et al.*, 2015), ont montré une amélioration de l'acquisition de l'apprentissage moteur suite à 3 séances de 1 mA de SCD anodale pendant 20 minutes, en évaluant la SVIPT (Reis *et al.*, 2015; Saucedo Marquez *et al.*, 2013) et la tâche de pianotage sur le clavier d'un ordinateur (SAQTAP) (Saucedo Marquez *et al.*, 2013). Une diminution du taux d'erreur et de la vitesse de réponse évalués par la SRTT, suite à trois sessions de 1 mA de SCD pendant 15 minutes, révèlent une amélioration significative de l'apprentissage moteur implicite (Kantak, Mummidisetty et Stinear, 2012; Nitsche *et al.*, 2003), et explicite (C J Stagg *et al.*, 2011). Plus récemment, une méta-analyse de Hashemirad et ses collègues (2016) a inclus vingt études expérimentales qui ont évalué l'efficacité de l'application de la SCD anodale sur le cortex moteur de plus de 160 adultes sains, pendant une tâche motrice séquentielle (SRTT). Cette revue a montré que trois ou quatre sessions de SCD anodale

peuvent améliorer significativement l'apprentissage moteur pendant la phase d'acquisition et de rétention. Ce résultat peut confirmer le rôle du cortex moteur dans l'apprentissage moteur et particulièrement dans la phase de rétention (Galea, Vazquez, Pasricha, Orban De Xivry et Celnik, 2011; Nitsche *et al.*, 2003). Cette application de SCD anodale pourra montrer des résultats semblables dépendamment du rôle de la région stimulée, l'augmentation de l'activité au niveau du cervelet pourra potentiellement améliorer l'acquisition de l'apprentissage moteur.

### **2.5.3.2. Efficacité de la SCD appliquée au niveau du cervelet**

Plusieurs études ont évalué l'efficacité de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet chez des sujets sains durant différentes tâches motrices. En effet, des études récentes ont montré que trois sessions de 20 minutes avec 2 mA de SCD anodale améliorent significativement l'acquisition, marquée par une meilleure précision lors de la séquence motrice de SVIPT, incluant 33 adultes sains (Cantarero *et al.*, 2015), mesuré par la SRTT pour 21 adultes sains dans une autre étude (Ferrucci *et al.*, 2013) et chez 33 personnes âgées en bonne santé mesuré par un exercice moteur « center-out » de rotation (Hardwick *et al.*, 2014), ces derniers ont montré une réduction de taux d'erreur comparable au groupe de jeune (groupe placebo qui n'ont pas reçu le courant actif) suite à 15 minutes de SCD anodale. Ces études ont montré que le cervelet possède un rôle important dans l'acquisition de l'apprentissage moteur implicite et que l'application de la SCD peut entraîner un apprentissage plus rapide.

Une étude récente a comparé l'efficacité de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet par rapport à son application au niveau du cortex moteur primaire afin de mieux distinguer le rôle de chaque structure dans les différentes phases d'apprentissage moteur. Les résultats de cette étude ont montré que l'application de la SCD au niveau des deux structures améliore la rétention, mais c'est surtout l'application de la SCD au niveau du cervelet qui améliore l'acquisition de l'apprentissage moteur, notée via une réduction du taux d'erreur de la SRTT (Ehsani, Bakhtiary, Jaberzadeh, Talimkhani et Hajihassani, 2016). Dans ce même sens, une autre étude a montré que l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet dans une tâche d'adaptation visuo-motrice a un effet de réduction du taux d'erreur ce qui permet un apprentissage moteur plus rapide sans influencer la rétention; alors que l'application de la SCD au niveau du M1 n'a donné son effet qu'en phase de rétention (Joseph M. Galea *et al.*, 2011). Plusieurs études

documentent l'effet de la SCD sur l'apprentissage moteur sur le plan clinique, mais l'effet neurophysiologique de la SCD au niveau de cervelet reste peu documenté. Des données parcellaires suggèrent que la SCD anodale augmente l'excitabilité neuronale au niveau de cervelet, présumant des cellules de Purkinje, modulant ainsi le circuit inhibiteur cerebello-cortical (Grimaldi *et al.*, 2014). Par ailleurs, plusieurs études appliquant la SCD anodale au niveau de cervelet montre une augmentation de l'excitabilité corticale au site de stimulation chez des adultes en bonne santé (Galea, Jayaram, Ajagbe et Celnik, 2009; Grimaldi *et al.*, 2014). En résumé, ces données antérieures montrent le rôle clé joué par le cervelet dans l'acquisition de l'apprentissage moteur et l'efficacité de la SCD anodale pour améliorer l'apprentissage moteur particulièrement dans la phase d'acquisition.

### **2.5.3.3. Efficacité de la SCD auprès des adultes ayant des troubles neurologiques**

Suite aux résultats de recherche auprès de sujets présentant des troubles neurologiques, plusieurs auteurs suggèrent que l'application de la SCD anodale à faible intensité (1 à 2 mA) au niveau du cervelet pourrait être un outil intéressant pour améliorer l'apprentissage moteur (Ferrucci, Bocci, Cortese, Ruggiero et Priori, 2016). Les effets bénéfiques de la SCD sur la motricité et les fonctions sensorimotrices ont été démontrés chez des sujets ayant la maladie de Parkinson (Fregni *et al.*, 2006, Boggio *et al.*, 2006, Gruner *et al.*, 2010). Par exemple, l'application de la SCD anodale a montré une amélioration de la fonction motrice pour 17 personnes atteintes de Parkinson. Cette amélioration a été mesurée via le temps de réaction (la rapidité de l'appui sur le bouton d'un clavier d'ordinateur suite à la l'apparition d'un stimulus visuel) et le PPT (Purdue Pegboard Test), qui évalue la fonction motrice de la main (Fregni *et al.*, 2006). Une autre étude réalisée auprès des sujets ayant un AVC a montré une diminution du nombre d'erreurs lors d'une tâche de SRTT pratiquée par la main plégique, après une séance de 20 minutes de 1 mA de SCD anodale appliquée au niveau du M1 (Celnik, Nam-Jong, Vandermeeren, Dimyan et Cohen, 2009). D'autre part, un groupe des patients ayant un AVC sous-cortical ischémique (11 adultes) a reçu 1 mA de SCD cathodique pendant 20 minutes, l'application de la SCD a engendré un apprentissage moteur plus rapide évalué par la SRTT et maintenu au moins pendant une semaine (Zimmerman *et al.*, 2012). Dans l'ensemble, les revues évaluant l'efficacité de la SCD sur les patients ayant des troubles neurologiques démontrent un effet bénéfique sur leur fonction motrice en général

(Ferrucci *et al.*, 2016) et sur leur apprentissage moteur en particulier (Reis et Fritsch, 2011), confortant l'idée que la SCD pourrait être un outil efficace pour optimiser l'apprentissage moteur chez plusieurs populations.

#### **2.5.3.4. Efficacité de la SCD auprès des enfants**

Récemment, des études ont évalué la faisabilité de l'application de la SCD et les effets sur différentes fonctions cognitives et motrices auprès de populations pédiatriques tels que les enfants ayant une dystonie (Young, Bertucco et Sanger, 2014), un trouble du spectre autistique (Amatachaya *et al.*, 2014), un trouble déficitaire de l'attention (Soltaninejad, Nejati et Ekhtiari, 2015), la schizophrénie (Mattai *et al.*, 2011) et la paralysie cérébrale (Grecco *et al.*, 2017). Dans ce sens, Ciechanski et Kirton (2016) ont évalué l'application de la SCD sur l'apprentissage moteur de 24 enfants sains, d'âge scolaire, sur le niveau de la dextérité manuelle, la performance et l'apprentissage moteur. L'application de courant direct anodale de 1 mA au niveau du cortex moteur, pendant 20 minutes, durant trois sessions a montré une amélioration significative de l'apprentissage moteur sur le plan fonctionnel marquée par un taux de réponse plus rapide sur la SRTT et une amélioration de la rétention après six semaines (Ciechanski et Kirton, 2016). Les résultats de cette étude sont encourageants, malgré l'absence des données neurophysiologiques pour clarifier le mécanisme de la SCD chez l'enfant. Toutefois, les effets cliniques sont intéressants pour explorer l'utilisation de cette technique auprès des enfants ayant des troubles neurodéveloppementaux. Cette technique pourrait être particulièrement intéressante pour les enfants ayant un TAC puisque qu'ils ont une diminution de l'activité neuronale et que la SCD pourrait être efficace pour l'augmenter et ainsi améliorer l'apprentissage moteur.

À la lumière de ces informations, on conclut que le TAC se manifeste par des troubles d'apprentissage et de coordination ayant des impacts négatifs sur la vie quotidienne, scolaire, sociale et psychologique de l'enfant. Ce déficit demeure existant malgré les traitements en réadaptation qui encouragent l'enfant à développer des stratégies cognitives pour améliorer son apprentissage et l'exécution de tâches motrices (Biotteau *et al.*, 2016), probablement sans agir sur les éléments physiopathologiques en cause dans ce déficit. Des études antérieures ont suggéré que l'augmentation de l'activité neuronale du cervelet pourrait être une cible d'intervention afin d'améliorer la

performance et la coordination motrice des enfants ayant un TAC. D'autre part, l'application de la SCD anodale a montré des améliorations significatives sur l'acquisition de l'apprentissage moteur et la performance motrice. Ainsi, évaluer l'application de la SCD apparaît nécessaire afin d'explorer des avenues thérapeutiques qui pourraient permettre d'améliorer l'apprentissage, le contrôle moteur et la coordination motrice chez les enfants ayant un TAC.

# **Chapitre 3 : Question de recherche, objectifs et les hypothèses de recherche**

## **3.1. Question de recherche**

Quelle est l'efficacité à court terme de la stimulation à courant direct appliquée au cervelet sur l'apprentissage moteur et la coordination motrice des enfants ayant un trouble de l'acquisition de la coordination âgés entre 10 et 17 ans ?

## **3.2. Les objectifs de recherche**

- I. Explorer l'efficacité de la SCD anodale appliquée au cervelet sur l'apprentissage moteur.
- II. Évaluer l'efficacité de la SCD anodale appliquée au cervelet sur la coordination motrice des membres supérieurs.

## **3.3. Hypothèses de recherche**

- I. L'application de la SCD anodale améliorera l'apprentissage moteur implicite observé par une diminution du temps de réponse et du taux d'erreur lors de la réalisation de la tâche de SRTT, tel que précédemment décrit dans des études ayant utilisé la SRTT auprès d'enfants ayant un TAC et la SCD auprès d'autres populations (Ferrucci et al., 2013; Savic et Meier, 2016)
- II. Une amélioration de la coordination motrice du membre supérieur dominant sera observée, ce qui se traduira par une diminution de la vitesse et une meilleure précision lors de la tâche doigt-nez; ceci repose sur le rôle du cervelet dans la coordination motrice chez les enfants ayant un TAC.

# Chapitre 4 : Méthodologie

## 4.1. Dispositif de recherche

Une étude expérimentale à devis avant-après et effectuée à double insu (pour le participant et l'intervenant) a été utilisée. Les participants ont été randomisés selon des blocs de 2X4 dans deux groupes à l'aide de la méthode des enveloppes scellées : 1) Groupe expérimental : SCD avec stimulation active et 2) Groupe témoin : SCD avec stimulation placebo. Les données recueillies par le groupe témoin ont été utilisées à des fins de référence pour mesurer l'efficacité de l'application de la SCD et ainsi contrôler pour d'éventuelles sources de biais.

## 4.2. Participants

Des enfants ayant un diagnostic médical de TAC âgés de 10 – 17 ans ont été recrutés. Les critères d'inclusion étaient : 1) compréhension fonctionnelle du français de l'enfant et des parents, et 2) droitiers ou de latéralité ambiguë selon le questionnaire latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971).

Les critères d'exclusion sont ceux documentés dans les écrits comme permettant d'assurer le caractère sécuritaire de l'application de la SCD (Moliadze *et al.*, 2015), soit : 1) présence de troubles cérébraux ou neurologiques, et 2) présence de maladies cérébrales inflammatoires, de troubles toxiques et tératogènes, de tumeurs malignes, de troubles moteurs ou de troubles neurodéveloppementaux dus à d'autres conditions médicales que le TAC (à l'exception du TDA/H), de troubles psychologiques, de privation de sommeil, de sevrage médicamenteux ou de prise de médicament affectant l'excitabilité corticale tel que les antidépresseurs et les antipsychotiques, la présence de lésion dermatologique au niveau du cuir chevelu, d'historique de crises épileptiques, d'implant métallique. Les participants ne devaient pas être sous l'effet de l'alcool ou de drogues pendant les séances.

### **4.3. Stratégie de recrutement et d'échantillonnage**

Un échantillonnage de convenance a été effectué et ciblait les jeunes du territoire du CIUSSS de l'Estrie-CHUS ayant un diagnostic médical de TAC. Des affiches (voir Annexe *ii*) et des dépliants ont été mis dans les salles d'attente des cliniques sur les troubles neurodéveloppementaux du CIUSSS de l'Estrie – CHUS (Hôpital Fleurimont) et du Centre de Réadaptation Estrie (CRE). De plus, l'information a été transmise à l'Association Québécoise pour les Enfants Dyspraxiques (AQED), qui a diffusé l'information concernant le projet dans son réseau (site Web, Facebook, Twitter, Journal aux membres). Les familles intéressées à participer au projet ont contacté un membre de l'équipe de recherche (l'étudiante-chercheuse). Nous avons également contacté les archives du CHUS et du CRE afin d'identifier les clients répondants à nos critères de sélection. Nous avons envoyé une lettre de non-objection de contact (consentement inversé) (voir Annexe *iii*) à ces participants potentiels. Nous avons téléphoné à ceux qui ne nous ont pas contactés et qui n'ont pas manifesté d'objection à ce que nous les contactions. Lors des conversations téléphoniques, l'intérêt à participer à l'étude et les critères d'admissibilité étaient vérifiés. Le cas échéant, le formulaire de consentement était envoyé par courriel ou par la poste aux familles, et un premier rendez-vous était planifié.

### **4.4. Déroulement de l'étude**

Les participants se sont déplacés au Centre de recherche du CHUS (CRCHUS) pour participer aux trois séances de stimulation et d'évaluation (voir Figure 1). Les sessions avaient une durée approximative d'une heure, sauf la 1<sup>ère</sup> séance qui durait environ 2h. Les séances étaient espacées de deux jours (48h). Le formulaire de consentement approuvé par le Comité éthique du CHUS (voir Annexe *iv*) était signé lors de la première rencontre (par le participant et son tuteur légal).

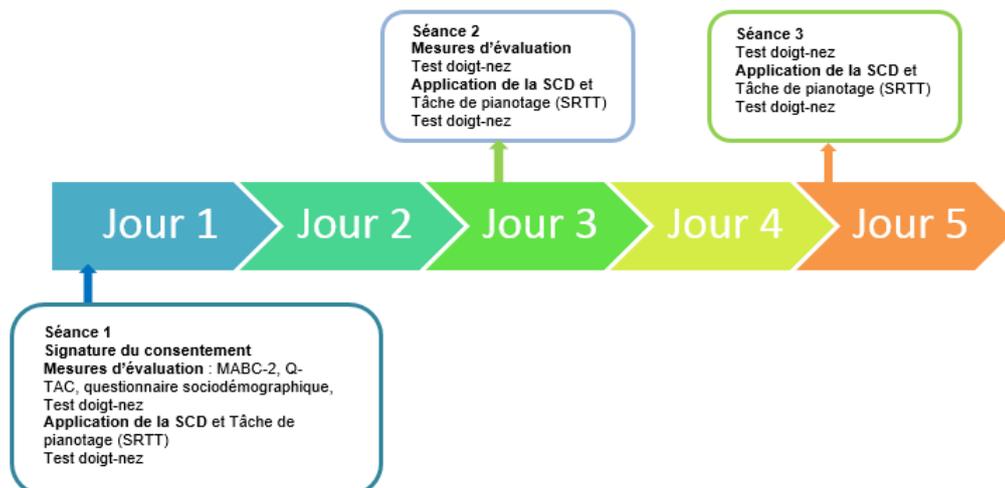


Figure 1 : Déroulement du projet de recherche

## 4.5. Randomisation

Les enfants étaient randomisés soit dans le groupe qui reçoit le courant actif, ou la stimulation placebo. La randomisation a été effectuée par un assistant de recherche (étudiant en physiothérapie) participant à la collecte des données. Une liste de randomisation a été générée à l'aide d'un logiciel et avec la méthode des blocs aléatoires 2-4, c'est-à-dire une liste contenant des blocs de 2 ou de 4 participants de façon que les participants sont répartis en nombre égale dans les 2 groupes dans chaque bloc. Ce même assistant de recherche était responsable de la gestion des enveloppes scellées attribuant le participant à l'un des groupes. L'enveloppe correspondant au participant était ouverte lors de la 1ère séance par cet assistant de recherche, qui était également responsable d'appliquer la SCD et de moduler le courant afin de préserver l'insu pour l'évaluateur et le participant.

## 4.6. Variables et instruments

### 4.6.1. Variables de recrutement

La latéralité du participant a été déterminée à partir du score d'Edinburgh questionnaire (Oldfield, 1971). Ce questionnaire standardisé composé de 10 items est valide, fidèle et présente une bonne fidélité test-retest ( $r=0.8$ ) (McMeekan et Lishman, 1975). Il est très utilisé dans les pays francophones et anglophones (Williams, 1991).

Dans ce test, le participant (ou ses parents) doit répondre à des questions concernant l'utilisation de ses mains pour effectuer diverses tâches : écrire, dessiner, lancer un objet, utiliser des ciseaux, tenir sa brosse à dents, se servir d'une cuillère, serrer son mouchoir sur son nez, ouvrir une fenêtre, craquer une allumette, dévisser un bouchon. Le quotient de latéralité est calculé en additionnant le nombre de réponses associées à la main droite (D) et le nombre de réponses associées à la main gauche (G). Pour les items où les participants sont vraiment indifférents, on met une tique dans les deux colonnes (Williams, 1991). Le calcul du score de latéralité est le suivant :  $(D - G) / (D + G) \times 100$ . Selon Oldfield (1971), un score entre 0 et 100 indique une dominance latérale droite, alors qu'un résultat entre -100 à 0 indique une dominance latérale gauche. Plus le score s'approche de 0, plus l'enfant présente une latéralité ambiguë. Dans notre étude, nous avons considéré les enfants ayant un score entre -50 et 50 comme étant de latéralité ambiguë, tel qu'indiqué dans des études antérieures (Ngomo, Leonard et Mercier, 2012).

#### 4.6.2. Variables descriptives

Les variables sociodémographiques ont été collectées lors la première rencontre à l'aide d'un questionnaire qui a été rempli par le parent. Ce formulaire a été développé à partir de plusieurs questionnaires déjà existants et a permis de documenter la composition de l'échantillon en regard du sexe, de l'âge et de la présence d'autres diagnostics médicaux. D'autres données concernant notamment la situation familiale et économique du participant et les services reçus par l'enfant ont été colligées dans le cadre d'une étude parallèle de faisabilité réalisée par un groupe d'étudiants en physiothérapie.

La sévérité des difficultés de coordination a été évaluée par le Movement Assessment Battery for Children-2 (MABC-2) (Henderson et *al.*, 2007). Le MABC-2 est un outil validé (Brown et Lalor, 2009) permettant d'évaluer les difficultés motrices chez les enfants. Il est recommandé pour documenter la présence du TAC, plus particulièrement en lien avec le critère 1 du DSM-V (Blank, Smits-Engelsman, Polatajko et Wilson, 2012). Le MABC-2 comprend 8 items classifiés en trois domaines : la dextérité manuelle, lancer et attraper un ballon, et l'équilibre statique et

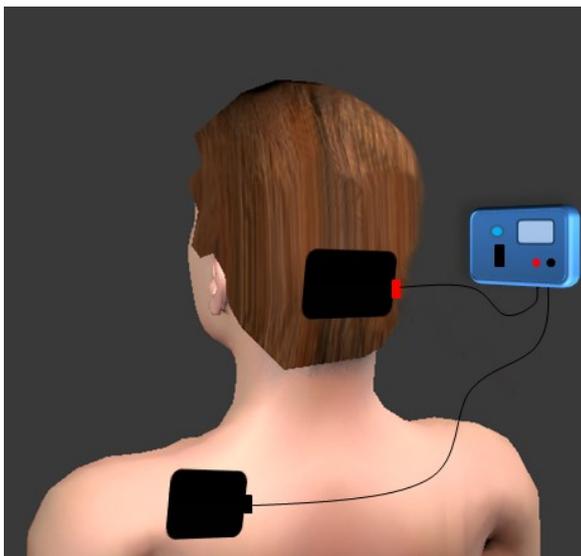
dynamique. Le score au MABC-2 permet de classer les enfants en fonction de leur rang percentile en regard des difficultés motrices (peu de difficultés, à risque, ou difficultés motrices sévères) (Blank *et al.*, 2012). La durée totale du déroulement du test est d'environ 50 minutes. Le MABC-2 présente une excellente fidélité test-retest (Corrélation intra-classe (CCI)=0.8), la fidélité inter-observateur est jugée bonne à excellente avec un CCI de 0.92 à 1.00 (Chow et Henderson, 2003), la fidélité intra-observateur est bonne (CCI=0.79), la cohérence interne du questionnaire est jugée excellent (Alpha de Cronbach=0.9) (Wuang, Su et Su, 2012), et il possède une bonne validité de contenu et de construit (Lane et Brown, 2015).

L'impact fonctionnel de TAC dans la vie de l'enfant a été documenté par la version 10 à 15 ans du test Q-TAC (Martini, 2011). Le Q-TAC est une version traduite et valide du « Developmental Coordination Disorder Questionnaire'07 (DCDQ'07) » (Martini et Wilson, 2012). Ce test a montré une excellente cohérence interne (Alpha de Cronbach=0.94), et une bonne fidélité test-retest, ainsi que des bonnes validités (concurrente, de contenu, et de construit) et une bonne sensibilité et spécificité. Différentes versions de ce questionnaire sont destinés aux parents d'enfants de 5 à 15 ans (Martini et Wilson, 2012). Le Q-TAC (version française) comprend 15 items qui documentent trois facteurs : la coordination générale, la motricité fine/écriture, et le contrôle du mouvement. Une échelle de Likert de 0 à 5 est utilisée pour un score total de 75. Les résultats du questionnaire sont calculés en additionnant les sommes de chaque item, et selon l'âge chronologique de l'enfant, le score total indique si un TAC est très probable, possible, ou très peu probable.

#### **4.6.3. Variable indépendante (l'intervention)**

Le groupe expérimental (groupe A) a reçu une stimulation cérébelleuse anodale à l'aide d'un appareil HDC-Kit (Magstim, UK) approuvé par Santé Canada durant 3 séances de 20 minutes à l'intérieure d'une semaine (avec une fréquence d'un jour sur deux). Chacune des deux électrodes était placée dans une éponge humide imbibée d'eau saline agissant comme conducteur. L'électrode anodale de 35cm<sup>2</sup> (7×5cm) était centrée horizontalement au niveau de l'inion et la deuxième électrode (cathodique) de 25cm<sup>2</sup> (5×5cm) était placée sur l'épaule gauche selon les protocoles de stimulation du cervelet (Ferrucci *et al.*, 2013) (Voir Figure 2). L'appareil de stimulation était relié aux deux électrodes et produisait un courant constant de 2 mA avec une densité de courant de

0,057 mA/cm<sup>2</sup> durant 20 minutes (Ferrucci *et al.*, 2013). Le groupe placebo (groupe B) a reçu un courant nul durant 20 minutes. Durant chaque séance, le participant était assis confortablement sur une chaise devant l'écran d'un ordinateur (pour effectuer la tâche de pianotage). Le responsable de la stimulation (qui connaissait le groupe d'appartenance du participant) avait préalablement réglé les paramètres de la stimulation.



*Figure 2 : Représentation schématique de l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet*

#### **4.6.4. Variables dépendantes**

##### **4.6.4.1. Apprentissage moteur**

Dans notre étude, la vitesse de réponse et le taux d'erreur durant l'exécution de la tâche de pianotage SRTT (Nissen et Bullemer, 1987) (Voir Figure3) ont été utilisés pour évaluer l'apprentissage moteur. Ces variables sont communément utilisées pour évaluer l'apprentissage moteur chez les enfants ou les adultes (Ciechanski et Kirton, 2016; Ehsani *et al.*, 2016; Ferrucci *et al.*, 2013). La vitesse de réponse correspond au temps requis entre l'apparition de stimulus et le clique du participant. Les temps inférieurs à 250ms ont été exclus, étant donné qu'il s'agit du temps minimal d'une réaction physiologique indiquant une réponse motrice volontaire (Ciechanski et Kirton, 2016; Gheysen *et al.*, 2011). Le taux d'erreur correspond au nombre des fois où le participant n'appuie pas sur le bouton correspondant (Voir Figure 3). Ces deux variables sont enregistrées automatiquement par le logiciel «*SuperLab 5 software*» (Cedrus,

California, CA). Le total des taux d'erreur et la vitesse des réponses correctes sont calculés par bloc.

La vitesse de réponse et le taux d'erreur sont donc calculées durant la tâche de SRTT afin d'évaluer l'acquisition de l'apprentissage moteur. La SRTT a été décrite par Robertson comme « une tâche puissamment sophistiquée » pour mesurer l'apprentissage moteur (Robertson, 2007). Cette tâche est très fréquemment utilisée en combinaison avec la SCD puisqu'elle est sensible pour détecter des changements sur le plan de l'apprentissage moteur durant la phase d'acquisition (Saucedo Marquez *et al.*, 2013). Cette tâche est non seulement jugée efficace pour mesurer le « taux » d'apprentissage, mais aussi elle permet de minimiser les facteurs externes tels que la fatigue et la motivation (Robertson, 2007).

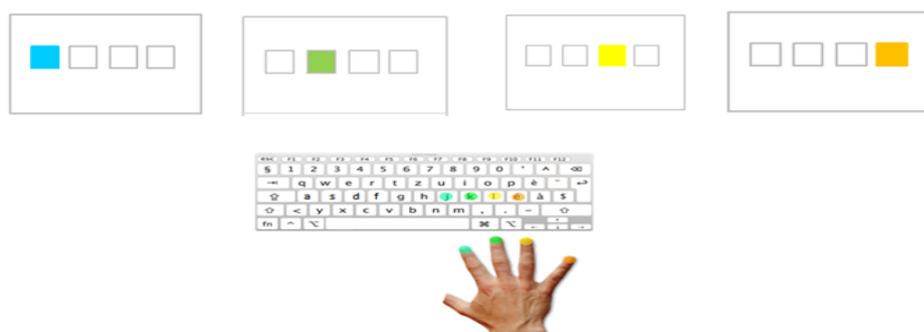


Figure 3 Tâche de pianotage « Serial Reaction Time Task » - SRTT

#### 4.6.4.2. La coordination motrice au membre supérieur

Le TDN a été utilisé pour évaluer le changement de la coordination motrice au membre supérieur suite à l'application de la SCD. En position assise avec les yeux fermés, le sujet touche la pointe de son nez avec son index (position de départ). Puis, il effectue une extension complète du coude et revient toucher à la pointe de son nez. Chaque série comporte 5 mouvements qui sont répétés et chronométrés. Les mesures de ce test sont : la dysmétrie et le temps requis pour compléter chaque série.

Ce test présente une excellente fidélité intra et inter-évaluateur ( $CCI > 0.97$ ) (Swaine, Lortie et Gravel, 2005) et une bonne fidélité test-retest (après 24 h) ( $CCI = 0.82$ ) (Swaine *et al.*, 2005).

## 4.7. Calcul de la taille d'échantillon

Puisque aucune étude ne document l'efficacité de la SCD chez les enfants ayant un TAC, la taille d'échantillon a été calculée en utilisant la vitesse de réaction lors de la tâche de SRTT et la taille de l'effet identifiée dans une étude ayant évalué l'application de la SCD anodale chez des sujets adultes sains (Ferrucci *et al.*, 2013). Ainsi, pour une puissance de 80 % et un taux de signification de 5 %, en prenant en compte un taux d'abandon de 20 %, 12 participants étaient nécessaires dans chaque groupe. L'objectif était de recruter 24 participants au total et de pouvoir faire les analyses sur 20 participants.

## 4.8. Analyse statistique

Les analyses quantitatives ont été effectuées avec le logiciel SPSS (Version 24). Des analyses descriptives pour les variables continues (moyenne et écart-type, ou médiane et interquartile si les données n'étaient pas normalement distribuées) et ordinales (fréquence et pourcentage) ont été réalisées pour décrire notre échantillon. La normalité des données a été vérifiée statistiquement à l'aide du test Shapiro Wilks et graphiquement à l'aide d'histogrammes. Ainsi, pour comparer les données socio-démographiques entre les deux groupes, le test de t a été utilisé pour comparer les âges, le test exact de Fisher a été utilisé pour le sexe, et le test non paramétrique de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer la latéralité entre les deux groupes, et le test Khi-2 a été utilisé pour comparer les scores de Q-TAC et de MABC-2.

L'analyse des objectifs 1 et 2 a été faite à l'aide des tests ANOVA à temps répétés à deux groupes. Ces analyses ont permis d'évaluer les changements sur les mesures du taux d'erreur et sur la vitesse de réponse lors de la tâche de pianotage (c'est-à-dire de blocs A1 à A5 durant chaque session), et sur la vitesse et la précision au TDN (par les valeurs pré et post). Les analyses ont pris en compte les résultats des participants aux 3 temps de mesures (S1, S2, S3) afin de comparer l'évolution des différentes variables en fonction du groupe (interaction temps\*groupe). Puisque les participants différaient de façon importante quant à leur niveau de base, des ratios ont été effectués en utilisant la première mesure comme dénominateur. Par la suite, puisque ces valeurs n'étaient pas normalement distribuées elles ont été normalisées par transformations logarithmiques en base naturelle (Ln) avant de procéder à une ANOVA à temps répétées. Ceci fut réalisé

puisque'il n'existe pas de tests non-paramétriques pour les devis à mesure répétées et que c'est une approche communément utilisée pour ce genre d'étude. Cette approche fut appliquée à l'ensemble des mesures recueillis aux différents temps d'échantillonnage. Des corrections pour comparaisons multiples ont été appliquées lors des tests post-hoc uniquement.

#### **4.9. Considérations éthiques**

L'approbation finale du comité éthique du centre de recherche du Centre Hospitalier Universitaire de Sherbrooke a été obtenue en Juillet 2016 sous le numéro 2017-1451 (voire Annexe v).

Toutes les mesures nécessaires ont été prises afin d'assurer la confidentialité et le respect de la vie privée des participants. Toutes les informations nécessaires aux analyses de données ont été numérisées, codées, et protégées dans le but d'éviter d'y retrouver le nom des participants. Les participants et leurs parents ont été informés individuellement du but et des procédures de l'étude et ils ont signé les formulaires de consentement. Finalement, une compensation financière de 10 \$/évaluation a été remise aux parents pour couvrir les frais de déplacements et de stationnement.

#### **4.10. Procédures de sécurité et précautions lors de l'application de la SCD**

Plusieurs études démontrent que les effets secondaires reliés à l'utilisation de la SCD sont minimales (Krishnan *et al.*, 2015). De plus, l'utilisation d'éponges dans une solution d'eau saline diminue les risques d'effets indésirables cutanés (Krishnan *et al.*, 2015; Frank *et al.*, 2010). Une solution d'eau saline optimale, faiblement concentrée en NaCl (entre 15 et 140mM) (Fertonani, Ferrari et Miniussi, 2015), a été utilisée pour diminuer la sensation d'inconfort chez les participants (Krishnan *et al.*, 2015). Une inspection rigoureuse de la peau a été faite avant et après la stimulation par SCD, telle que recommandée (Frank *et al.*, 2010). Des intervalles de 48 h entre chaque application étaient prévue dans cette étude, ce qui est rapporté comme permettant de diminuer le risque d'effets secondaires cutanés bénins (Palm *et al.*, 2008).

## Chapitre 5 : Résultats: Article scientifique

**Titre:** Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation in Children with Developmental Coordination Disorder: A Randomized Sham-Controlled study

**Auteurs :** Haifa Akremi, Chantal Camden, Hélène Corriveau, Jean-Francois Lepage

**Statut de l'article :** Version soumise à *Archives Physical Medicine and Rehabilitation* le 07 Juin 2017 sous le numéro ARCHIVES-PMR-D-17-00728.

*de Sherbrooke*) in Sherbrooke, Québec, Canada.

### **Avant-propos :**

Haifa Akremi est l'auteure principale de l'article portant sur les résultats de l'étude; elle a notamment élaboré le projet de recherche, participé au recrutement, mené la collecte des données et initié l'ensemble du processus de rédaction. Les co-auteurs en tant que directeurs de recherche et membre du comité d'encadrement ont supervisé l'ensemble du processus, contribuant à l'analyse des données et à la rédaction de l'article. Tous les co-auteurs ont autorisé de cet article à figurer dans le mémoire (Voir Annexe 7 pour le formulaire *Autorisation d'intégration d'un article écrit en collaboration à un mémoire*).

## 5.1. Résumé

**Introduction :** Le trouble de l'acquisition de la coordination (TAC) est un trouble neurodéveloppemental chronique qui touche l'apprentissage moteur et la coordination motrice. Les connaissances indiquent que ces difficultés pourraient notamment résulter d'une diminution de l'activité neuronale au niveau de cervelet. Augmenter l'activité neuronale au niveau de cervelet pourrait permettre d'améliorer l'apprentissage moteur. La stimulation à courant direct (SCD) est un outil neurostimulateur non-invasif dont l'application pourrait être efficace vu les résultats antérieurs chez différentes populations en santé ou ayant des troubles neurologiques. La SCD n'a cependant jamais été utilisée chez les enfants ayant un TAC.

**Objectif :** Cette étude vise à évaluer l'efficacité de la SCD au niveau du cervelet sur l'apprentissage et la coordination motrice des enfants ayant un TAC.

**Méthodes :** Une étude randomisée à double insu a été utilisée. Dix-neuf participants ont été randomisés dans deux groupes (stimulation active ou placebo). L'intervention consistait en l'application de la SCD anodale au niveau de cervelet pendant trois sessions avec une fréquence d'un jour sur deux. L'efficacité de la SCD a été mesurée par la vitesse et le taux d'erreurs lors de la tâche de pianotage sur le clavier d'un ordinateur (SRTT). Ces variables permettaient d'évaluer l'apprentissage moteur alors que la coordination motrice du membre supérieur a été évaluée par le test doigt-nez (TDN).

**Résultats :** La SCD tend à réduire le taux d'erreur à la SRTT ( $p=0,07$ ), mais il n'y a pas de différences statistiquement significatives pour la vitesse de réponse entre les deux groupes. L'application de la SCD n'a pas montré d'amélioration significative sur la coordination motrice.

**Conclusion :** La SCD semble améliorer l'apprentissage moteur par la réduction de taux d'erreur chez les enfants ayant un TAC. Des futures recherches sont nécessaires afin d'explorer l'efficacité de la SCD chez les enfants ayant un TAC.

**Mots clés :** Le trouble de l'acquisition de la coordination, stimulation à courant direct, apprentissage moteur, cervelet, dyspraxie.

## 5.2. Abstract

**Background:** Developmental coordination disorder (DCD) is a chronic neurodevelopmental condition affecting motor learning and coordination, that may be caused by decreased neuronal activity in the cerebellum. It has been proposed that increasing cerebellar activity could improve motor learning and coordination in children with DCD, yet this hypothesis has yet to be tested. Transcranial direct current stimulation (tDCS) is a non-invasive neurostimulation technique that can modulate neuronal excitability. While its application over the cerebellum has been shown to enhance motor learning in adults, its efficacy in children with DCD remains unknown.

**Objective:** The aim of this study was to assess the effect of cerebellar tDCS on motor learning and coordination in children with DCD.

**Methods:** A double-blind, randomized sham-controlled study was conducted on 19 children with DCD. The intervention consisted of three sessions of anodal or sham cerebellar tDCS, administered every other day while participants performed a serial reaction time task (SRTT). Coordination of the upper limb was assessed with the finger-nose test before and after stimulation.

**Results:** Participants motor coordination and speed during the SRTT did not differ between the sham and active tDCS groups, but active tDCS tended to reduce the error rate during motor learning ( $p=0.07$ ).

**Conclusion:** Our results suggest that three sessions of cerebellar tDCS could help improve accuracy during motor learning in children with DCD, without affecting overall learning speed. These findings highlight the potential usefulness of tDCS as a therapeutic tool in DCD rehabilitation.

**Keywords:**

Transcranial direct current stimulation; neurodevelopmental disorders; motor learning; cerebellum; dyspraxia.

## 5.3. Manuscript

### Introduction

Developmental coordination disorder (DCD) is neurodevelopmental condition affecting 5-6% of school age children (American Psychiatric Association, 2013). It is characterized by coordination and motor learning difficulties not caused by other medical or intellectual disorder (American Psychiatric Association, 2013). The coordination impairments significantly impact daily activities, and can lead to detrimental physical and mental health consequences (O’Dea et Connell, 2016).

Motor learning difficulties appear to be central to the challenges experienced by children with DCD. DCD is often presented as a motor learning disorder [3,4]. Children show delays in achieving developmental milestones, such as learning to cycle, handwrite, or tie shoelaces, and require more time, repetition and feedback than their peers to perform motor tasks. Current therapeutic interventions based on task oriented approaches can enhance motor learning through the use of practical and cognitive strategies where children practice and learn to elaborate motor plans and to correct their errors (Schoemaker et Smits-engelsman, 2015). Although the results of a meta-analysis confirm the effectiveness of these interventions (Bouwien C M Smits-Engelsman *et al.*, 2013), the targeted neurological mechanisms remain unclear, with their benefits in improving daily functioning perhaps only being compensatory in nature.

The neurophysiopathology of motor learning impairments in children with DCD is generally poorly understood. Recent functional Magnetic Resonance Imagery (fMRI) studies have shown abnormal recruitment of several brain regions crucial to motor learning, planning, and performance. These alterations suggest reduced activity in the cortical regions, including the dorsolateral prefrontal cortex, the precentral gyrus, and parietal cortex, all of which are involved in motor learning and are part of the cerebellar loop (Kelly et Strick, 2003; Zwicker *et al.*, 2011). The cerebellum seems particularly affected in DCD (Debrabant *et al.*, 2013; Zwicker *et al.*, 2010, 2011). Given its well established role in motor skill acquisition (Galea *et al.*, 2011), coordination (Ramnani *et al.*, 2001), and in the correction of motor commands in error-dependent learning (Schlerf, Galea, Bastian et Celnik, 2012), the cerebellum may be key to explaining the difficulties observed in children with DCD. Functional alterations have been clearly

seen in the crus I, lobule VI and lobule IX of the cerebellum, areas involved in motor coordination, precision, learning, and working memory (Debrabant *et al.*, 2013; Zwicker *et al.*, 2011). The cerebellum has thus been suggested as having a causal role in the neuropathophysiology of DCD (Biotteau *et al.*, 2016; Brown-Lum et Zwicker, 2015; Debrabant *et al.*, 2013). Increasing the activity of the cerebellum may be a potent strategy to improving motor learning in children with DCD (Brown-Lum et Zwicker, 2015).

Transcranial direct current stimulation (tDCS) is a non-invasive brain stimulation technique that relies on the application of a weak electric current (2mA) to modulate brain activity (Nitsche et Paulus, 2000). Typically, a two-electrode montage is used; a current travels from the anode to the cathode, resulting in increased excitability to the region located under the anode (Nitsche et Paulus, 2000). Anodal tDCS (a-tDCS) has enhanced motor function and performance in adults (Giordano *et al.*, 2017; Thibaut *et al.*, 2013), and more recently in children (Ciechanski et Kirton, 2016). The primary motor cortex and cerebellum are often targeted due to their well-documented role in motor learning (Galea *et al.*, 2011). The cerebellum is particularly involved in the task acquisition phase, defined by the performance of novel tasks during training (on-line effects), while the primary motor cortex appears to be most important in the task retention phase, which is the capacity to maintain behavioural gains after practice (off-line effects) (Galea *et al.*, 2011). Cerebellar a-tDCS application has shown improvements in motor learning in healthy individuals (Ferrucci *et al.*, 2013; Savic et Meier, 2016) or in those with neurological diseases, including ataxic cerebral palsy (Ferrucci *et al.*, 2016; Grecco *et al.*, 2017).

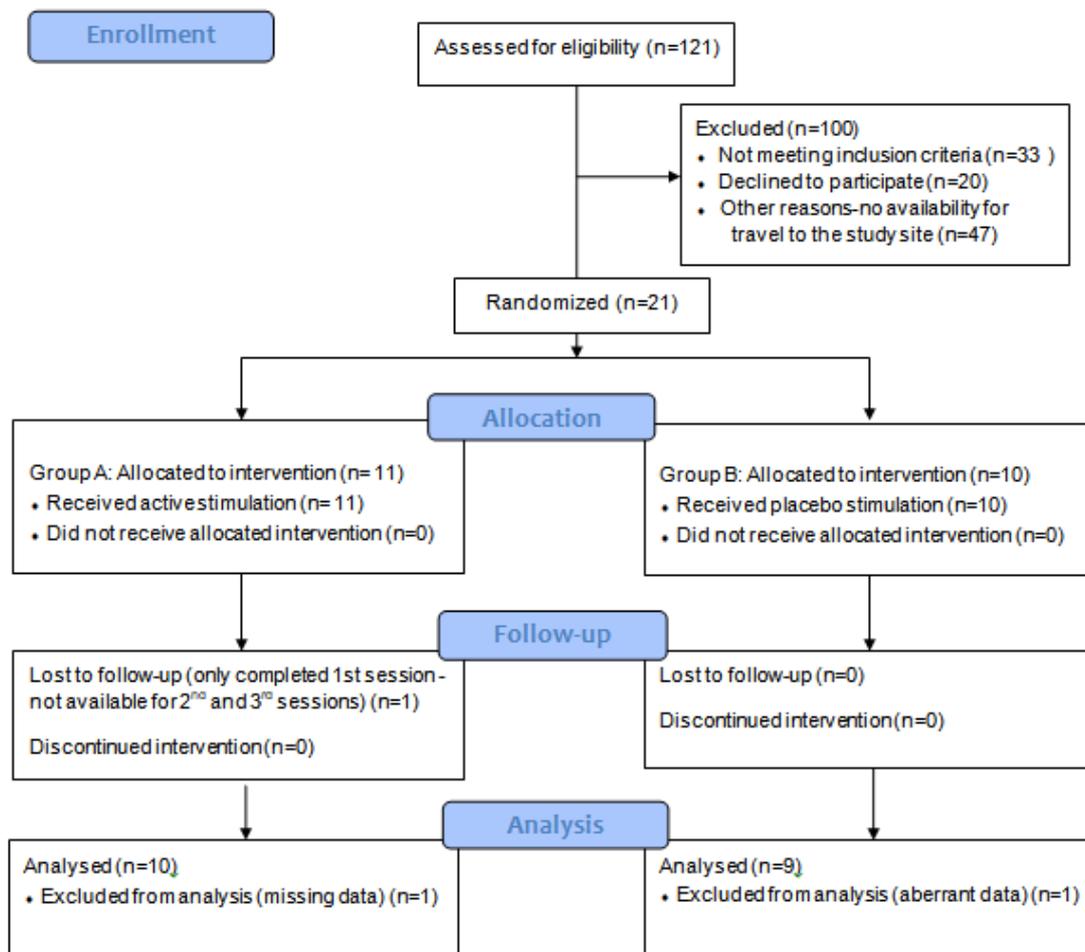
The effects of tDCS on motor learning are often exemplified using tasks such as the Serial Reaction Time Task (SRTT) (Nissen et Bullemer, 1987), an established implicit motor learning task (Robertson, 2007; Saucedo Marquez *et al.*, 2013). Recent studies have demonstrated that 20 minutes of cerebellar a-tDCS can significantly enhance the acquisition and retention of motor learning in healthy adults (Cantarero *et al.*, 2015; Ehsani *et al.*, 2016; Ferrucci *et al.*, 2013). A recent study also highlighted greater motor learning after a-tDCS on the primary motor cortex in healthy children (Ciechanski et Kirton, 2016).

Our current study aimed to assess the efficacy of cerebellar a-tDCS in modulating implicit motor learning in children with DCD. We hypothesized that cerebellar tDCS would increase motor learning speed, decrease error rate, and improve coordination.

## **Methods**

### **Participants**

Data were analysed for nineteen children with DCD who were recruited from date to date via public adds, social media, and medical archives of the institution (e.g., December 2015 to February 2016) (see Figure 1). Participants were included if they were: 1) aged between 10 and 16 years old; 2) right handed or ambidextrous (Edinburgh Handedness Inventory score  $\geq -50$  (Oldfield, 1971)); and 3) had a confirmed medical diagnostic of DCD. Exclusion criteria encompassed all contraindication for tDCS (Ferrucci *et al.*, 2013) and having a neurological, other neurodevelopmental or psychiatric conditions (with the exception of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD), given its high prevalence in DCD). All participants' parents provided written informed consent to participate in this study, which was approved by our institutional ethic board.



*Figure 1 : Flow Diagram illustrating enrollment of participants*

Before the first session, the level of motor impairment was evaluated using Movement Assessment Battery of Children-2nd edition (MABC-2) (Henderson, Sugden et Barnett, 2007). The MABC-2 uses a percentile rank to categorize children as having severe ( $\leq 5$  percentile), significant ( $5 < \text{Range} \leq 15$ ), or no coordination difficulties ( $\geq 15$  percentile). The impact of DCD on daily activities was evaluated using the Developmental Coordination Disorder Questionnaire French Canadian (DCD-Q) (Fritsch *et al.*, 2010), where the total score indicates a suspicion or not of DCD. Participants and the evaluator were blinded to the participants' group throughout the research procedure. During the analyses, we excluded data from a participant who is absent during the 2nd and 3rd sessions and another participant who presents aberrant data (i.e. his answers are beyond the physiological threshold  $>250$  ms for visuo-motor stimulation)

### **Study design and protocol**

A double-blind, randomized sham-controlled study design was used. After confirming their eligibility, participants were randomly assigned to the experimental (i.e. active tCDS) or sham group, using computerized random blocks of 2-4. The study protocol was the same for both group and included three stimulation sessions every other day for 5 days.

### **Intervention: Transcranial Direct Current Stimulation**

Direct current was delivered through an HDCKit device (Magstim, UK) for 20 minutes during each session, following the parameters and montage described in previously published adult protocols (Cantarero *et al.*, 2015; Ehsani *et al.*, 2016; Ferrucci *et al.*, 2013). The current was delivered through two saline-soaked sponge electrodes; a  $35\text{cm}^2$  ( $7 \times 5\text{cm}$ ) anode was centred on the median line 2 cm belowinion of the occipital bone (Ferrucci *et al.*, 2013), while a  $25\text{cm}^2$  ( $5 \times 5\text{cm}$ ) cathode was positioned over the left shoulder. The electrodes were fixed in place with 2 rubber straps, one around the head and the other on the left arm. In the active stimulation condition, current intensity was set at 2 mA, while during placebo stimulation, the same

montage used a current intensity of zero, by turning off the device. Approximately 40% of children that received placebo stimulation thought that they belonged to the experimental group.

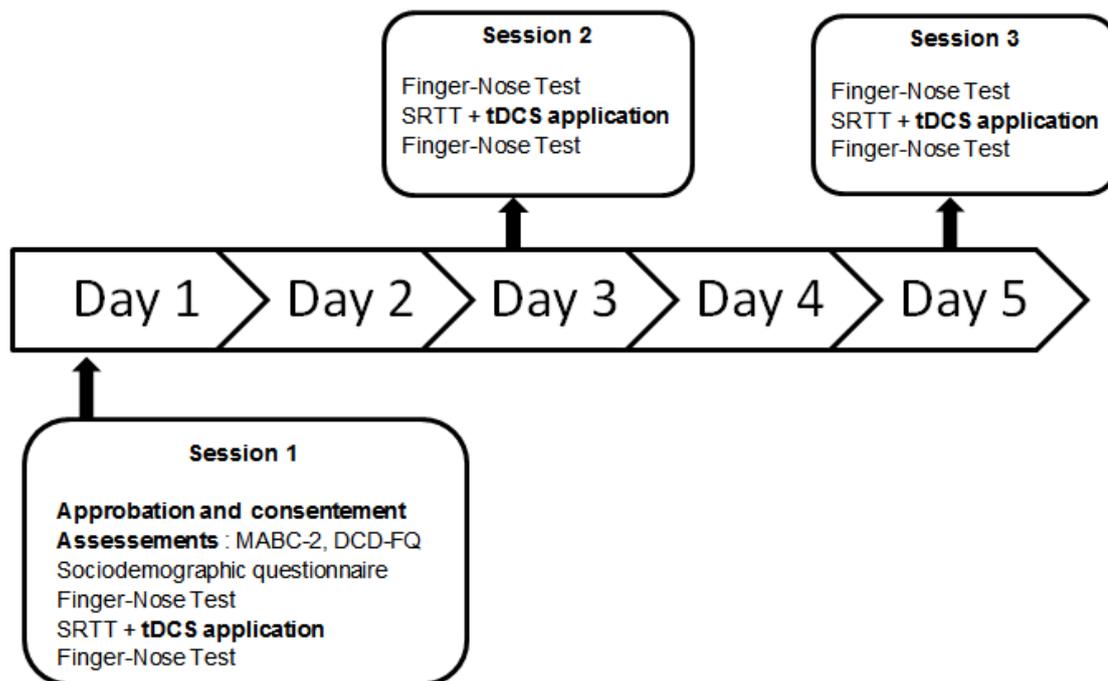
### **Motor learning task: Serial Reaction Time Task (SRTT)**

Motor learning was assessed with an adapted version of the SRTT, a well-established computerized-task used with tDCS to evaluate implicit motor learning (Ciechanski et Kirton, 2016; Nissen et Bullemer, 1987). Six blocks were presented, each consisting of 120 trials. The first block consisted of a random stimuli (P1); since it was used as practice, it was eliminated from our analysis. The five remaining blocks (A1, A2, A3, A4, A5) consisted in a 12-stimuli repeating sequence (4-2-3-1-1-3-2-1-3-4-2-4) and were used to induce motor learning. While sitting comfortably, participants were asked to place their index, middle, ring, and little fingers of their right hand above the four correspondent keys on a computer keyboard (“J”, ”K”, ”L”, and “:”, respectively). Four squares were presented on the computer screen, each corresponding to a specific key on the keyboard. For each trial, a given square was blacked-out and participants were instructed to press the correct key with the corresponding finger as fast as possible. Reaction time was calculated as the interval between the onset of the stimuli and the pressing of the key. The time interval between the response and the presentation of the next stimulus was fixed at 0ms, because short intervals prevent gaining explicit knowledge of the repeated sequence (Destrebecqz *et al.*, 2005). Subjects were allowed to take a few minutes rest between blocks to alleviate fatigue. Stimuli presentation and data recordings were managed with Superlab 5 software (Cedrus, California, CA). Reaction times under 250 ms were excluded, as they were not representative of a reaction-based response (Ciechanski et Kirton, 2016). Reaction time for correct responses were calculated in addition to the number of errors committed for each block. For analysis purposes, we used values of the second training block of the first session as the denominator to compute the ratio for all sequence blocks. Changes between the first (A1) and the last sequence blocks (A5) on each session assessed overall improvements during each session as they related to speed and errors. In each session, tDCS application started simultaneously with task onset, and stopped

after 20 minutes. Six children completed the task within the 20-minute stimulation time frame while 13 children need more time. Only two children noted the presence of a repetitive sequence.

### **Motor coordination: Finger Nose Test (FNT)**

To assess upper limb coordination, the Finger Nose Test (FNT) (Swaine *et al.*, 2005), a common clinical test (Swaine *et al.*, 2005) known for its excellent reliability in children with and without DCD (Peters *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 1992), was used. With eyes closed, participants were asked to touch their nose with their index finger, then fully extend the arm to shoulder level, and repeat the movement five times as fast and as accurately as possible. Children were allowed 10 practice attempts prior to performing the test. Completion time and accuracy (number of time touching their nose) were used as variables. The FNT was performed before and after each tDCS/SRTT session. Figure 2 describes the study procedures.



*Figure 2 : Study procedures and measures*

### Data analysis

T-tests, Fishers exact tests,  $\text{Khi}^2$  and the Mann-Whitney U tests compared descriptive characteristics between groups. Descriptive analyzes (mean and standard deviation for normally distributed continuous variables or median and interquartile otherwise, and frequency and percentage for ordinal data) were used to describe our sample. Since variables measuring motor learning and coordination were not normally distributed (reaction time, error/accuracy), and that non-parametric tests do not accommodate repeated measure designs, data were normalized using the logarithm function and submitted to a 2 X 2 X 3 repeated-measures ANOVA, with sessions (S1, S2, and S3) and block (A1, A5) as within factors, and group membership (active, sham) as between factor. Significance was set at 0.05 using two-tailed tests. The results below presented normalized data for error rate and reaction time SRTT, and rapidity and accuracy for FNT. All statistical analyses were performed with IBM SPSS® version 24 software.

### Results

#### Population Characteristics

Participants' characteristics (mean age =12.38 years old; SD: 1.98) are presented in Table 1. The two groups were similar on all variables. The overall sample was representative of the DCD population, with 63% being males and 68% having ADHD. As the first study using a tDCS application in this population, it should be underscored that no serious adverse effects occurred during or after the stimulation. The most common effects reported included redness at the stimulation site and slight fatigue, and participants could not distinguish whether they received the active stimulation or not (manuscript in preparation about study's feasibility).

*Table 1 : Participants' characteristics*

		<b>Total</b>	<b>Active-tDCS</b>	<b>Sham tDCS</b>	<b>p value</b>
Number of participant		19	10	9	–
Age (years old)		12.38 ( $\pm$ 1.98)	12.50 ( $\pm$ 1.84)	12.22 ( $\pm$ 2.22)	P=0.69
Sex (boy) N (pourcentage)		12 (63.20%)	7 (70%)	5 (55.60%)	P=0.65
Laterality (Edinburgh score) /100 median (interquartil)		100.00 (00.00)	100.00 (00.00)	100.00 (00.00)	P=0.95
MABC-2 score N (pourcentage)	Significant mouvement difficulty	8 (77.50%)	4 (40%)	4 (37.50%)	P=0.69
	Risk of mouvement difficulty	3 (35%)	1 (10%)	2 (25%)	
	Unlikely to	8 (87.50%)	5 (50%)	3 (37.50%)	

	have a mouvement difficulty				
DCD-Q scores	DCD indication	19 (100%)	10 (55.60%)	9 (44.40%)	P=0.78
N (pourcentage)	Probably no risque of DCD	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	

### Motor Learning: Reaction Time

Repeated measures ANOVA conducted on reaction time showed a significant main effect of *block* ( $F_{(1.00, 17)}=8.20$ ;  $p=0.01$ ) and *session* ( $F_{(1.89, 32.14)}=48.99$ ;  $p<0.01$ ), with participants improving their speed both within and across sessions. This suggests that the task was effective in inducing motor learning. However, there was no significant main effect for group ( $F_{(2,17)}=2.54$ ;  $p=0.10$ ), and no significant interaction between factors. Figure 3 illustrates the reaction time patterns for each group across the SRTT.

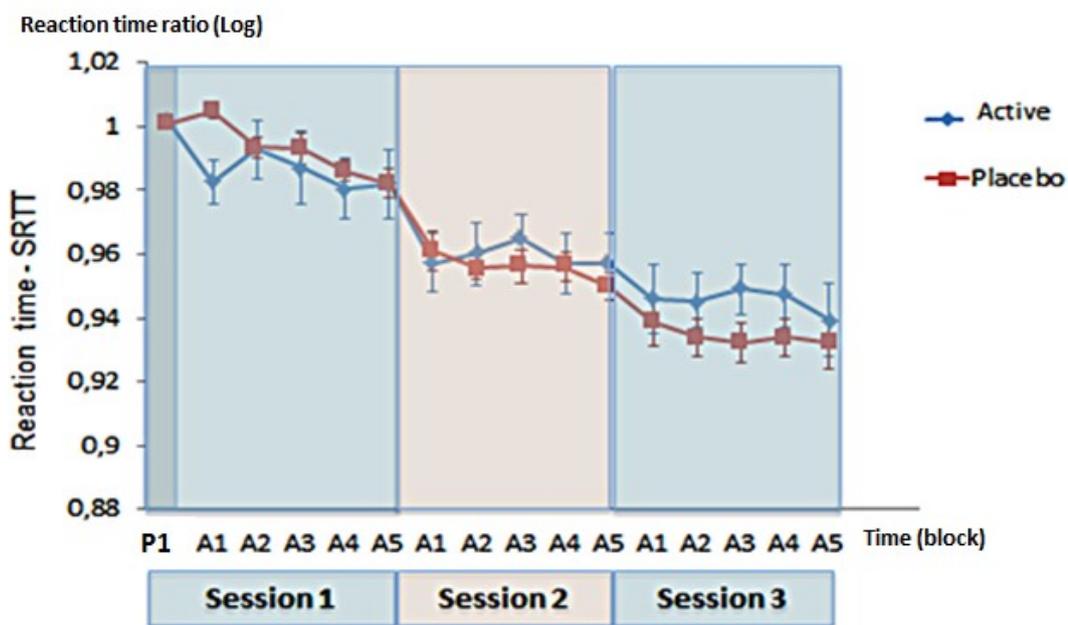


Figure 3 : Results of motor learning on SRTT reaction time

### Motor Learning: Error Rate

Repeated measures ANOVA on the number of errors revealed a significant main effect of session ( $F_{(1.98, 33.73)}=5.22$ ;  $p=0.02$ ), where the number of errors were significantly higher in the first session as compared to the second ( $p<0.01$ ) and third sessions ( $p=0.05$ ). A significant main effect of block was also noted ( $F_{(1,17)}=13.43$ ;  $p<0.01$ ), with the error rate being higher at the end than at the beginning of the session. Although the group receiving active tDCS tended to commit less errors than the sham group, the effect failed to reach statistical significance threshold ( $F_{(1,17)}=3.69$ ;  $p=0.07$ ). Error rate results for each group are shown in Figure 4.

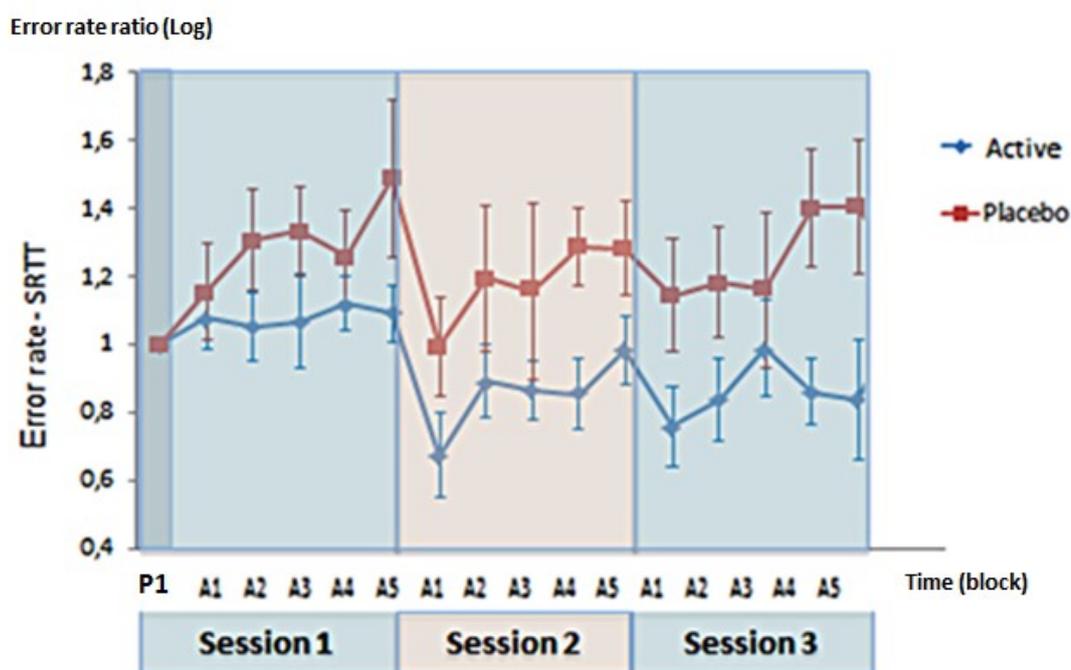


Figure 4 : Results of motor learning on SRTT error rate

### Motor Coordination: the Finger-Nose Test

For speed, repeated measures ANOVA showed a significant main effect of session ( $F_{(1.63, 27.78)}=9.93$ ;  $p<0.01$ ), but the group factor did not reach statistical significance ( $F_{(1,17)}=0.83$ ;  $p=0.37$ ) (See figure 5). The repeated measures ANOVA conducted on accuracy was not significant on session ( $F_{(1.72, 2.93)}=2.48$ ;  $p=0.10$ ) and on groups ( $F_{(1,17)}=0.44$ ;  $p=0.51$ ).

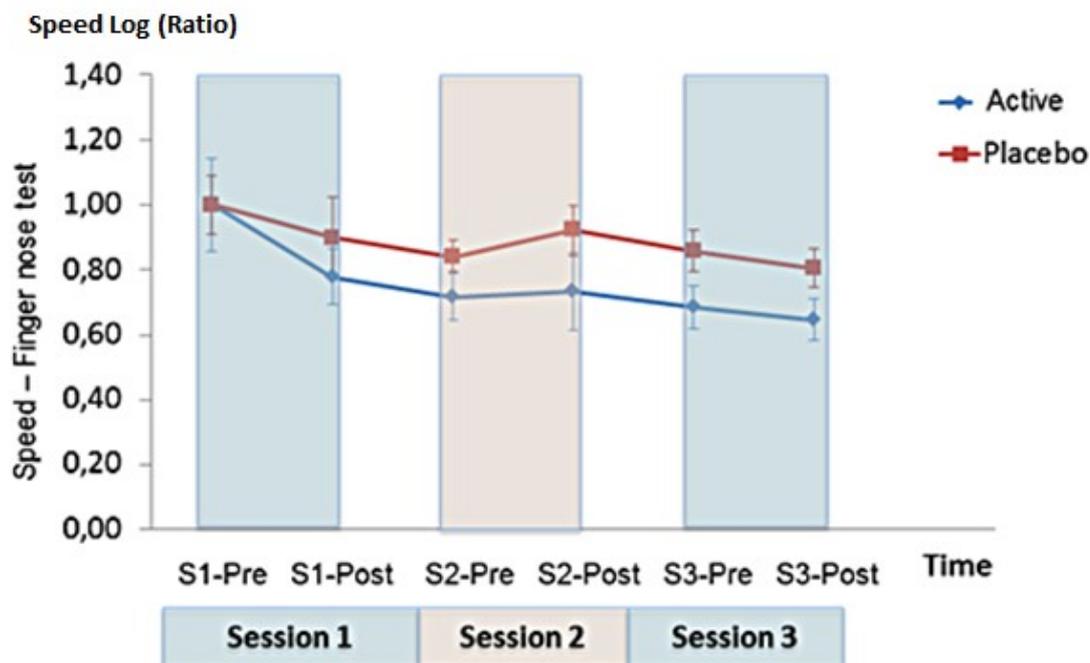


Figure 5 : Results of motor coordination on speed of FNT

## Discussion

The aim of this study was to assess the efficacy of cerebellar tDCS on motor learning in children with DCD. Our results show that three sessions of tDCS stimulation did not improve motor learning or upper limb motor coordination compared to sham stimulation, although the error rate on the SRTT tended to be lower in the experimental group, without reaching statistical significance. A practice effect was however found for all groups, on all variables, since both groups increased speed and decreased error rate on error rate on SRTT task between sessions, suggesting that the experimental protocol (that receive active stimulation) was efficient to induce motor learning in this group of children.

### Error rate

Errors made during the SRTT are a direct reflection of accuracy (Shmuelof, Krakauer et Mazzoni, 2012), a crucial component of motor learning. Our results show relative improvements in accuracy in the tDCS group. These findings are similar to

those published in adults using identical paradigms (Cantarero et al., 2013; Ehsani *et al.*, 2016) and comparable to other studies applying a-tDCS over the cerebellum (Galea *et al.*, 2011; Herzfeld *et al.*, 2014; Tseng *et al.*, 2007). Galea *et al.* and Jayaram and al. demonstrated that the a-tDCS applied to the cerebellum in healthy adults improves the adaptation phase by increasing accuracy (Galea *et al.*, 2011; Jayaram *et al.*, 2012). This improvement confirms that the role of the cerebellum in the acquisition motor learning is mediated by an excitability change. Our result seems to support that a-tDCS can enhance cerebellar excitability as demonstrated by improvements in accuracy. On the other hand, these improvements in motor learning may not be directly related to the local effects of cerebellar stimulation, but rather to its distal impact on regions involved in the cerebello-cortical loop, such as the prefrontal, parietal and primary motor regions (Cantarero *et al.*, 2015). Moreover, Kirton and colleagues showed that a-tDCS application on primary motor cortex can improve task acquisition and retention in healthy children (Ciechanski et Kirton, 2016). Numerous studies have documented the beneficial effects of cerebellar a-tDCS on motor learning in the acquisition phase with a-tDCS increasing neuronal activity in the primary motor cortex thus resulting in motor learning improvements, particularly in retention (Hummel et Cohen, 2006; Reis et Fritsch, 2011). These findings are extremely appealing considering the nature of the functional difficulties of children with DCD and their putative related neurological underpinning.

### **Reaction time**

All our participants significantly improved their speed during the SRTT task within and between sessions, suggesting a practise effect, but no differences were found between the groups on our normalized data. In this regard, our results differ from studies in healthy adult receiving cerebellar anodal tDCS, where significant improvement on reaction time during the SRTT were found (Ehsani *et al.*, 2016; Ferrucci *et al.*, 2013).

However, recent evidence suggest that motor learning improvements associated with cerebellar tDCS may be mediated by a reduction in error rate, which would favour faster responses by influencing the maintainance of the speed/accuracy ratio (Cantarero *et al.*, 2015). This is consistent in part with motor adaptation studies where tDCS

improved adaptation specifically by decreasing movement errors without affecting movement speed (Cantarero *et al.*, 2015; Galea *et al.*, 2011; Jayaram *et al.*, 2012). Cantarero and colleagues used a similar study design and found similar results to ours, with significant difference in reaction time between blocks and sessions, yet no significant difference between groups (Cantarero *et al.*, 2015).

The fact that all our participants were faster in the last block during each session is in concordance with others' findings assessing implicit learning using SRTT in adults, thus reflecting an adaptation to the motor task (Savic et Meier, 2016). Other studies have also specifically documented this phenomenon in children with DCD (Gheysen *et al.*, 2011; Lejeune *et al.*, 2013).

Motor learning acquisition in children with DCD and the effect of tDCS on motor learning depend on many factors; including motivation and fatigue (Wulf, Shea et Lewthwaite, 2010; Zwicker *et al.*, 2010). Children with DCD tend to be more anxious than other children (Pratt et Hill, 2011) and commonly report fatigue during the execution of motor learning tasks in this population (Zwicker *et al.*, 2010). These characteristics may affect their motivation and perseverance during the SRTT task and consequently, our results on reaction time and error rate.

### **Motor Coordination**

We were not only interested in motor learning improvements, but also on the functional gains, documented through motor coordination. Although cerebellar a-tDCS did not demonstrate an effect on upper limb motor coordination, all our participants showed an improvement in the speed of execution of the FNT test from session to session. Considering that this is the first study to assess the effects of cerebellar tDCS in children, it is difficult to interpret whether this lack of effect is typical of DCD, childhood, or due to the protocol used. However, the positive effect of cerebellar tDCS on motor coordination has been previously reported in patients with cerebella ataxia, a pathology characterized by motor coordination deficits (Pozzi *et al.*, 2014). Others have, however, found no effect on coordination, as measured by the Mechanical Counter Test, following cerebellar a-tDCS in adults with ataxia (Grimaldi et Manto, 2013). Repetitions might play a key role in explaining these controversial results. A recent

study of adults with neurodegenerative ataxia highlighted that two weeks of cerebellar anodal tDCS application improved the motor performance of ataxic patients, including finger-nose test scores (Benussi *et al.*, 2016). Future research is needed to clarify the cerebellum role in coordination difficulties in children with DCD, and to study if more frequent tDCS sessions may results in improvements in upper limb coordination.

### **Study limitations**

Like most initial studies using novel interventions, this study has its limitations. Firstly, participants in the active group tended to have less motor impairment than those in the sham group. Consequently this may have reduced our ability to find significant differences between groups since tDCS could have greater effects on patients presenting with more severe impairments (Thibaut *et al.*, 2013). Hence, it is plausible that a sample of children with DCD with more severe motor impairments may be more sensitive to the effects of tDCS. Secondly, other factors may also have influenced responsiveness to tDCS and could include the higher prevalence of ADHD and medication use in our active group. Given our small sample size, it was not possible to stratify children according to these factors, but future researches should seek to do so. Finally, the sensitivity of the FNT to assess the effects of tDCS on upper limb motor coordination is unknown, which may have contributed to the lack of between groups differences reported.

Further studies are needed to explore how the putative changes in cerebellar excitability induced by a-tDCS results in motor improvements, and clarify its effects on the distal regions of the brain. Furthermore, the effect of different stimulation modalities and sites in improving motor function of children with DCD should be investigated along with the potential gains of using tDCS as an adjuvant to intensive motor training therapies.

### **Conclusion**

The result of this innovative study demonstrated that the cerebellar tDCS application did not improve motor learning, but a tendency to decrease the error rate was found, although no reaching statistical significance. More research is needed to explore if tDCS

could eventually become an interesting complementary therapeutic tool for children with DCD.

## References:

- Adams, J. A., Gopher, D. et Lintern, G. (1975). The Effects of Visual and Proprioceptive Feedback on Motor Learning. *Sage Journal*, 19(2), 162-165. doi:10.1177/154193127501900204
- Amatachaya, A., Auvichayapat, N., Patjanasootorn, N., Suphakunpinyo, C., Ngernyam, N., Aree-uea, B., ... Auvichayapat, P. (2014). Effect of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation on Autism : A Randomized Double-Blind Crossover Trial, 2014.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5e édition)*. doi:10.1016/B978-1-4377-2242-0.00016-X
- Benussi, A., Era, V. D., Cotelli, M. S., Turla, M., Casali, C., Padovani, A. et Borroni, B. (2016). Long term clinical and neurophysiological effects of cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with neurodegenerative ataxia. *Brain Stimulation*. doi:10.1016/j.brs.2016.11.001
- Bikson, M., Inoue, M., Akiyama, H., Deans, J. K., Fox, J. E., Miyakawa, H. et Jefferys, J. G. R. (2004). Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *The physiology Society*, 1, 175-190. doi:10.1113/jphysiol.2003.055772
- Biotteau, M., Chaix, Y. et Albaret, J.-M. (2016). What Do We Really Know About Motor Learning in Children with Developmental Coordination Disorder? *Current Developmental Disorders Reports*. doi:10.1007/s40474-016-0084-8
- Blank, R., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H. et Wilson, P. (2012). European Academy for Childhood Disability (EACD): Recommendations on the definition, diagnosis and intervention of developmental coordination disorder (long version). *Developmental Medicine and Child Neurology*, 54(1), 54-93. doi:10.1111/j.1469-8749.2011.04171.x
- Boggio, P. S., Ferrucci, R., Rigonatti, S. P., Covre, P., Nitsche, M., Pascual-Leone, A. et Fregni, F. (2006). Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 249(1), 31-38. doi:10.1016/j.jns.2006.05.062
- Brown, T. et Lalor, A. (2009). The Movement Assessment Battery for Children—Second Edition (MABC-2): A Review and Critique. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 29(1), 86-103. doi:10.1080/01942630802574908
- Brown-Lum, M. et Zwicker, J. G. (2015). Brain Imaging Increases Our Understanding of Developmental Coordination Disorder: a Review of Literature and Future Directions. *Current Developmental Disorders Reports*, 2(2), 131-140. doi:10.1007/s40474-015-0046-6
- Buch, E. R., Santarnecchi, E., Antal, A., Born, J., Celnik, P. A., Gerloff, C., ... Eric, M. (2017). Effects of tDCS on motor learning and memory formation : a consensus and. *Clinical Neurophysiology*. doi:10.1016/j.clinph.2017.01.004

- Butler, X. R., Bernier, P., Lefebvre, J., Gilbert, G. et Whittingstall, K. (2017). Decorrelated Input Dissociates Narrow Band  $\alpha$  Power and BOLD in Human Visual Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 37(22), 5408-5418. doi:10.1523/JNEUROSCI.3938-16.2017
- Cairney, J., Kwan, M. Y. W., Hay, J. A. et Fought, B. E. (2012). Research in Developmental Disabilities Developmental Coordination Disorder , gender , and body weight : Examining the impact of participation in active play. *Research in Developmental Disabilities*, 33(5), 1566-1573. doi:10.1016/j.ridd.2012.02.026
- Cantarero, G., Spampinato, D., Reis, J., Ajagbe, L., Thompson, T., Kulkarni, K. et Celnik, P. (2015). Cerebellar direct current stimulation enhances on-line motor skill acquisition through an effect on accuracy. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 35(7), 3285-90. doi:10.1523/JNEUROSCI.2885-14.2015
- Cantarero, G., Tang, B., O'Malley, R., Salas, R. et Celnik, P. (2013). Motor learning interference is proportional to occlusion of LTP-like plasticity. *The Journal of Neuroscience*, 33(11), 4634-4641. doi:10.1523/JNEUROSCI.4706-12.2013
- Celnik, P. A., Nam-Jong, P., Vandermeeren, Y., Dimyan, M. et Cohen, L. G. (2009). Effects of combined peripheral nerve stimulation and brain polarization on performance of a motor sequence task after chronic stroke. *Stroke*, 40(5), 1764-1771. doi:10.1161/STROKEAHA.108.540500.
- Chow, S. M. K. et Henderson, S. E. (2003). Interrater and Test – Retest Reliability of the Movement Assessment Battery for Chinese Preschool Children. *American Journal of Occupational Therapy*, 57(5), 574-577.
- Ciechanski, P. et Kirton, A. (2016). Transcranial Direct-Current Stimulation Can Enhance Motor Learning in Children. *Cerebral Cortex*, 1-10. doi:10.1093/cercor/bhw114
- Debrabant, J., Gheysen, F., Caeyenberghs, K., Van Waelvelde, H. et Vingerhoets, G. (2013). Neural underpinnings of impaired predictive motor timing in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1478-1487. doi:10.1016/j.ridd.2013.02.008
- Debrabant, J., Vingerhoets, G., Van Waelvelde, H., Leemans, A., Taymans, T. et Caeyenberghs, K. (2015). Brain Connectomics of Visual-Motor Deficits in Children with Developmental Coordination Disorder. *The Journal of pediatrics*, 169, 21-27.e2. doi:10.1016/j.jpeds.2015.09.069
- Destrebecqz, A., Peigneux, P., Laureys, S., Degueldre, C., Fiore, G. Del, Linden, M. Van Der, ... Maquet, P. (2005). The neural correlates of implicit and explicit sequence learning : Interacting networks revealed by the process dissociation procedure. *Learning and Memory*, (12), 480-490. doi:10.1101/lm.95605.6
- Dewey, D. et Bernier, F. P. (2016). The Concept of Atypical Brain Development in Developmental Coordination Disorder ( DCD ) — a New Look. *Current Developmental Disorders Reports*, 3, 161-169. doi:10.1007/s40474-016-0086-6

- Doyon, J. et Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. doi:10.1016/j.conb.2005.03.004
- Doyon, J., Owen, A. M., Petrides, M., Sziklas, V. et Evans, A. C. (1996). Functional Anatomy of Visuomotor Skill Learning in Human Subjects Examined with Positron Emission Tomography, 8(March 1995).
- Dweck, C. S. et Leggett, E. L. (1988). A Social-Cognitive Approach to Motivation and Personality. *American Psychological Association*, 95(2), 256-273.
- Edwards, J., Berube, M., Erlandson, K., Haug, S., Johnstone, H., Meagher, M., ... Zwicker, J. G. (2011). Developmental Coordination Disorder in School-Aged Children Born Very Preterm and / or at Very Low Birth Weight : A Systematic Review. *journal of developmental and behavior pediatrics*, 32, 678-687.
- Ehsani, F., Bakhtiary, A. H., Jaberzadeh, S., Talimkhani, A. et Hajihassani, A. (2016). Differential effects of primary motor cortex and cerebellar transcranial direct current stimulation on motor learning in healthy individuals : A randomized double-blind sham-controlled study. *Neuroscience Research*, 112, 10-19. doi:10.1016/j.neures.2016.06.003
- Ferguson, G. D., Jelsma, J. et Versfeld, P. (2014). Using the ICF Framework to Explore the Multiple Interacting Factors Associated with Developmental Coordination Disorder. *Current Developmental Disorders Reports*, 86-101. doi:10.1007/s40474-014-0013-7
- Ferrucci, R., Bocci, T., Cortese, F., Ruggiero, F. et Priori, A. (2016). Cerebellar transcranial direct current stimulation in neurological disease. *Cerebellum & Ataxias*. doi:10.1186/s40673-016-0054-2
- Ferrucci, R., Brunoni, A. R., Parazzini, M., Vergari, M., Rossi, E., Fumagalli, M., ... Priori, A. (2013). Modulating human procedural learning by cerebellar transcranial direct current stimulation. *Cerebellum*, 12(4), 485-492. doi:10.1007/s12311-012-0436-9
- Ferrucci, R. et Priori, A. (2014). NeuroImage Transcranial cerebellar direct current stimulation ( tcDCS ): Motor control , cognition , learning and emotions. *NeuroImage*, 85, 918-923. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.04.122
- Fertonani, A., Ferrari, C. et Miniussi, C. (2015). What do you feel if I apply transcranial electric stimulation? Safety, sensations and secondary induced effects. *Clinical Neurophysiology*, 126(11), 2181-2188. doi:10.1016/j.clinph.2015.03.015
- Figlewski, K., Blicher, J. U., Mortensen, J., Severinsen, K. E., Nielsen, J. F. et Andersen, H. (2017). Transcranial Direct Current Stimulation Potentiates Improvements in Functional Ability in Patients With Chronic Stroke Receiving Constraint-Induced Movement Therapy. *Stroke*, 48(1), 1-5. doi:10.1161/STROKEAHA.116.014988
- Forssberg, H. (1999). Neural control of human motor development. *Neural control of human motor development*, 9, 676-682.

- Frank, E., Wilfurth, S., Landgrebe, M., Eichhammer, P., Hajak, G. et Langguth, B. (2010). Anodal skin lesions after treatment with transcranial direct current stimulation. *Brain Stimulation*, 3(1), 58-59. doi:10.1016/j.brs.2009.04.002
- Fregni, F., Boggio, P. S., Santos, M. C., Lima, M., Vieira, A. L., Rigonatti, S. P., ... Pascual-leone, A. (2006). Noninvasive Cortical Stimulation With Transcranial Direct Current Stimulation in Parkinson ' s Disease, 21(10), 1693-1702. doi:10.1002/mds.21012
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K., Schambra, H. M., Ji, Y., Cohen, L. G. et Lu, B. (2010). Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: Potential implications for motor learning. *Neuron*, 66(2), 198-204. doi:10.1016/j.neuron.2010.03.035
- Galea, J. M., Jayaram, G., Ajagbe, L. et Celnik, P. (2009). Modulation of Cerebellar Excitability by Polarity-Specific Noninvasive Direct Current Stimulation. *Journal of Neuroscience*, 29(28), 9115-9122. doi:10.1523/JNEUROSCI.2184-09.2009
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., Orban De Xivry, J. J. et Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: The motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral Cortex*, 21(8), 1761-1770. doi:10.1093/cercor/bhq246
- Gandiga, P. C., Hummel, F. C. et Cohen, L. G. (2006). Transcranial DC stimulation (tDCS): A tool for double-blind sham-controlled clinical studies in brain stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 845-850. doi:10.1016/j.clinph.2005.12.003
- Gheysen, F., Van Waelvelde, H. et Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 749-756. doi:10.1016/j.ridd.2010.11.005
- Giordano, J., Bikson, M., Kappenman, E. S., Clark, V. P., Coslett, H. B., Hamblin, M. R., ... Wurzman, R. (2017). Mechanisms and Effects of Transcranial Direct Current Stimulation. *Dose-Response: An international Journal*, 1-22. doi:10.1177/1559325816685467
- Gomez, A. et Sirigu, A. (2015). Developmental coordination disorder: Core sensori-motor deficits, neurobiology and etiology. *Neuropsychologia*, 79, 272-287. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.032
- Goyen, T. et Lui, K. (2009). Developmental coordination disorder in “ apparently normal ” schoolchildren born extremely preterm. *Archives disabilities children*, 94, 298-302. doi:10.1136/adc.2007.134692
- Grecco, A. L. C., Oliveira, C. S., Almeida, N. De, Duarte, C., Lima, V. L. C. C., Zanon, N. et Fregni, F. (2017). Cerebellar transcranial direct current stimulation in children with ataxic cerebral palsy : A sham- controlled , crossover , pilot study. *Developmental Neurorehabilitation*, 20(3), 142-148. doi:10.3109/17518423.2016.1139639
- Grimaldi, G., Argyropoulos, G. P., Bastian, A., Cortes, M., Davis, N. J., Edwards, D. J.,

- ... Celnik, P. (2014). Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation (ctDCS): A Novel Approach to Understanding Cerebellar Function in Health and Disease. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 1073858414559409-. doi:10.1177/1073858414559409
- Grimaldi, G. et Manto, M. (2013). Anodal Transcranial Direct Current Stimulation ( tDCS ) Decreases the Amplitudes of Long-Latency Stretch Reflexes in Cerebellar Ataxia. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(11), 2437-2447. doi:10.1007/s10439-013-0846-y
- Hardwick, R. M. et Celnik, P. A. (2014). Neurobiology of Aging Cerebellar direct current stimulation enhances motor learning in older adults. *Neurobiology of Aging*, 1-5. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2014.03.030
- Harris, S., Mickelson, E. et Zwicker, J. G. (2015). Diagnosis and management of developmental coordination disorder. *Canadian Medical Association Journal*, 187(9), 659-666.
- Hashemirad, F., Zoghi, M., Fitzgerald, P. B. et Jaberzadeh, S. (2016). The effect of anodal transcranial direct current stimulation on motor sequence learning in healthy individuals: A systematic review and meta-analysis. *Brain and Cognition*, 102, 1-12. doi:10.1016/j.bandc.2015.11.005
- Henderson, S. E., Sugden, D. A. et Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children (2nd ed.)*.
- Hermsen, A., Haag, A., Duddek, C., Balkenhol, K., Bugiel, H., Bauer, S., ... Rosenow, F. (2016). Test-retest reliability of single and paired-pulse transcranial magnetic stimulation parameters in healthy subjects. *Journal of the Neurological Sciences*, 362, 209-216. doi:10.1016/j.jns.2016.01.039
- Herzfeld, D. J., Pastor, D., Haith, A. M., Rossetti, Y., Shadmehr, R. et Shea, J. O. (2014). Contributions of the cerebellum and the motor cortex to acquisition and retention of motor memories. *NeuroImage*, 1053-8119. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.04.076
- Holsti, L., Grunau, R. et Whitfield, M. (2002). Developmental coordination disorder in extremely low birthweight children ( <= 800 Developmental Coordination Disorder in Extremely Low Birth Weight Children at Nine Years. *Pediatric Research*, 23(1), 8-15.
- Honda, M., Deiber, M., Iba, V., Pascual-leone, A., Zhuang, P. et Hallett, M. (1998). Dynamic cortical involvement in implicit and explicit motor sequence learning A PET study. *Brain*, 121, 2159-2173.
- Hummel, F. C. et Cohen, L. G. (2006). Non-invasive brain stimulation : a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke ?, 5(August), 708-712.
- Immink, M. A. et Wright, D. L. (2001). Motor Programming During Practice Conditions High and Low in Contextual Interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 423-437. doi:10.1037//0096-1523.27.2.423

- Ito, M. (2000). Mechanisms of motor learning in the cerebellum. *Brain Research*, 886(1-2), 237-245. doi:10.1016/S0006-8993(00)03142-5
- Jayaram, G., Tang, B., Pallegadda, R., Vasudevan, E. V. L., Celnik, P. et Bastian, A. (2012). Modulating locomotor adaptation with cerebellar stimulation. *Journal of Neurophysiology*, 107(11), 2950-2957. doi:10.1152/jn.00645.2011
- Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L. et Clark, J. E. (2004). Visuomotor Adaptation in Children with Developmental Coordination Disorder. *Human kinetics Publishers*, 8(November), 450-460. doi:10.1123/mcj.8.4.450
- Kang, N., Summers, J. J. et Cauraugh, J. H. (2016). Transcranial direct current stimulation facilitates motor learning post-stroke : a systematic review and meta-analysis, 345-355. doi:10.1136/jnnp-2015-311242
- Kantak, S. S., Mummidisetty, C. K. et Stinear, J. W. (2012). Primary motor and premotor cortex in implicit sequence learning – evidence for competition between implicit and explicit human motor memory systems. *European Journal of Neuroscience*, 36(February), 2710-2715. doi:10.1111/j.1460-9568.2012.08175.x
- Kelly, R. M. et Strick, P. L. (2003). Cerebellar Loops with Motor Cortex and Prefrontal Cortex of a Nonhuman Primate. *The Journal of Neuroscience*, 23(23), 8432-8444.
- Kim, S., Stephenson, M. C., Morris, P. G. et Jackson, S. R. (2014). tDCS-induced alterations in GABA concentration within primary motor cortex predict motor learning and motor memory: A 7T magnetic resonance spectroscopy study. *NeuroImage*, 1053-8119. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.05.070
- Krishnan, C., Santos, L., Peterson, M. D. et Ehinger, M. (2015). Brain Stimulation Safety of Noninvasive Brain Stimulation in Children and Adolescents. *Brain Research*, 8, 76-87.
- Lage, M., Ugriniwitsh, H., Apolinario-Souza, T., Mario Vieira, M., Albuquerque, M. . et Novellino Benda, R. (2015). Repetition and variation in motor practice: a review of neural correlates Guilherme. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. doi:10.1016/j.neubiorev.2015.08.012
- Lane, H. et Brown, T. (2015). Scandinavian Journal of Occupational Therapy Convergent validity of two motor skill tests used to assess school-age children Convergent validity of two motor skill tests used to assess school-age children. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 22, 161-172. doi:10.3109/11038128.2014.969308
- Latash, M. L., Scholz, J. P. et Schöner, G. (2002). Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exercise & Sport Sciences Review*, 30(1), 26-31.
- Lejeune, C., Catale, C., Willems, S. et Meulemans, T. (2013). Intact procedural motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(6), 1974-1981. doi:10.1016/j.ridd.2013.03.017
- Lejeune, C., Wansard, M., Geurten, M. et Meulemans, T. (2014). Procedural learning ,

- consolidation , and transfer of a new skill in Developmental Coordination Disorder. *Child Neuropsychology*, 2014(February 2015), 37-41.  
doi:10.1080/09297049.2014.988608
- Lepage, J.-F., Morin-Moncet, O., Beaulé, V., de Beaumont, L., Champoux, F. et Théoret, H. (2012). Occlusion of LTP-like plasticity in human primary motor cortex by action observation. *PloS one*, 7(6), e38754.  
doi:10.1371/journal.pone.0038754
- Levac, D., Wishart, L., Missiuna, C., Ont, O. et Wright, V. (2011). The Application of Motor Learning Strategies Within Functionally Based Interventions for Children with Neuromotor Conditions. *Pediatric Physical Therapy*, 345-355.  
doi:10.1097/PEP.0b013e3181beb09d
- López-alonso, V., Cheeran, B. et Fernández-del-olmo, M. (2015). Brain Stimulation Relationship Between Non-invasive Brain Stimulation-induced Plasticity and Capacity for Motor Learning, 8.
- Martini, R. et Wilson, B. N. (2012). French Canadian cross-cultural adaptation of the Developmental Coordination Disorder Questionnaire '07: DCDQ-FC. *Canadian Journal of Occupational Therapy*. doi:10.2182/cjot.2011.78.5.7
- Mattai, A., Miller, R., Weisinger, B., Greenstein, D., Bakalar, J., Tossell, J., ... Rapoport, J. (2011). Tolerability of transcranial direct current stimulation in childhood-onset schizophrenia. *Brain Stimulation*, 4(4), 275-280.  
doi:10.1016/j.brs.2011.01.001
- Maxwell, J. P., Masters, R. S. . et Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(4), 1049-1068.
- McMEEKAN, E. R. L. et Lishman, W. a. (1975). Retest reliabilities and interrelationship of the Annett Hand Preference Questionnaire and the Edinburgh Handedness Inventory. *British Journal of Psychology*, 66(1), 53-59.  
doi:10.1111/j.2044-8295.1975.tb01439.x
- Moliadze, V., Andreas, S., Lyzhko, E., Schmanke, T., Gurashvili, T., Freitag, C. M. et Siniatchkin, M. (2015). Ten minutes of 1mA transcranial direct current stimulation was well tolerated by children and adolescents: Self-reports and resting state EEG analysis. *Brain Research Bulletin*, 119, 25-33.  
doi:10.1016/j.brainresbull.2015.09.011
- Nadeau, A., Lungu, O. et Duchesne, C. (2017). A 12-Week Cycling Training Regimen Improves Gait and Executive Functions Concomitantly in People with Parkinson ' s Disease, 10(January), 1-10. doi:10.3389/fnhum.2016.00690
- Ngomo, S., Leonard, G. et Mercier, C. (2012). Influence of the amount of use on hand motor cortex representation: Effects of immobilization and motor training. *Neuroscience*, 220, 208-214. doi:10.1016/j.neuroscience.2012.06.018
- Ngomo, S., Leonard, G., Moffet, H. et Mercier, C. (2012). Comparison of transcranial magnetic stimulation measures obtained at rest and under active conditions and

- their reliability. *Journal of Neuroscience Methods*, 205(1), 65-71.  
doi:10.1016/j.jneumeth.2011.12.012
- Nissen, M. J. et Bullemer, P. (1987). Attentional Requirements of Learning : Evidence from Performance Measures. *cognitive psychology*, 32.
- Nitsche, M. a et Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, 527 Pt 3, 633-9. doi:PHY\_1055 [pii]
- Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W. et Tergau, F. (2003a). Facilitation of Implicit Motor Learning by Weak Transcranial Direct Current Stimulation of the Primary Motor Cortex in the Human. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 619-626. doi:10.1162/089892903321662994
- Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W. et Tergau, F. (2003b). Facilitation of Implicit Motor Learning by Weak Transcranial Direct Current Stimulation of the Primary Motor Cortex in the Human. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 619-626.
- O’Dea et Connell, A. (2016). Performance difficulties , activity limitations and participation restrictions of adolescents with developmental coordination disorder ( DCD ). *British Journal of Occupational Therapy*, 79(9), 540-549.  
doi:10.1177/0308022616643100
- Oberman, L. M. et Enticott, P. G. (2015). Editorial: The safety and efficacy of noninvasive brain stimulation in development and neurodevelopmental disorders. *Frontiers in human neuroscience*, 9(October), 1543-1554.  
doi:10.1212/WNL.57.9.1543
- Oldfield, R. C. (1971). Oldfield1971.pdf. *Neuropsychologia*, 9, 97 - 113.
- Palm, U., Keeser, D., Schiller, C., Fintescu, Z., Reisinger, E., Padberg, F. et Nitsche, M. (2008). Skin lesions after treatment with transcranial direct current stimulation (tDCS). *Brain Stimulation*, 1(4), 386-387. doi:10.1016/j.brs.2008.04.003
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A. et Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of neurophysiology*, 74(3), 1037-45. Repéré à <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7500130>
- Peters, L. H. J., Maathuis, K. G. B., Kouw, E., Hamming, M. et Hadders-algra, M. (2008). Original article Test – retest , inter-assessor and intra-assessor reliability of the modified Touwen examination. *European Journal of Paediatric Neurology*, 12, 328-333. doi:10.1016/j.ejpn.2007.09.006
- Podda, M. V., Cocco, S., Mastrodonato, A., Fusco, S., Leone, L., Barbati, S. A., ... Grassi, C. (2016). Anodal transcranial direct current stimulation boosts synaptic plasticity and memory in mice via epigenetic regulation of Bdnf expression. *Nature Publishing Group*, 1-19. doi:10.1038/srep22180

- Pozzi, N. G., Minafra, B., Zangaglia, R., Marzi, R. De, Sandrini, G., Priori, A. et Pacchetti, C. (2014). Transcranial Direct Current Stimulation ( tDCS ) of the Cortical Motor Areas in Three Cases of Cerebellar Ataxia. *Cerebellum*, *13*, 109-112. doi:10.1007/s12311-013-0524-5
- Pratt, M. L. et Hill, E. L. (2011). Research in Developmental Disabilities Anxiety profiles in children with and without developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *32*(4), 1253-1259. doi:10.1016/j.ridd.2011.02.006
- Purtsi, J., Vihko, V., Kankaanpää, A. et Havas, E. (2012). The Motor-Learning Process of Older Adults in Eccentric Bicycle Ergometer Training. *Journal Aging and Physical Activity*, *20*, 345-362.
- Querne, L., Berquin, P., Vernier-Hauvette, M. P., Fall, S., Deltour, L., Meyer, M. E. et de Marco, G. (2008). Dysfunction of the attentional brain network in children with Developmental Coordination Disorder: A fMRI study. *Brain Research*, *1244*, 89-102. doi:10.1016/j.brainres.2008.07.066
- Ramnani, N., Toni, I., Passingham, R. E. et Haggard, P. (2001). The Cerebellum and Parietal Cortex Play a Specific Role in Coordination : A Pet Study. *NeuroImage*, *911*, 899-911. doi:10.1006/nimg.2001.0885
- Rasmussen, P. et Gillberg, C. (2000). Natural Outcome of ADHD With Developmental Coordination Disorder at Age 22 Years : A Controlled , Longitudinal , Community-Based Study. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *39*(11), 1424-1431. doi:10.1097/00004583-200011000-00017
- Reis, J., Fischer, J. T., Prichard, G., Weiller, C., Cohen, L. G. et Fritsch, B. (2015). Time- but Not Sleep-Dependent Consolidation of tDCS-Enhanced Visuomotor Skills, (January), 109-117. doi:10.1093/cercor/bht208
- Reis, J. et Fritsch, B. (2011). Modulation of motor performance and motor learning by transcranial direct current stimulation. *Current Opinion in Neurology*, *24*, 1350-7540. doi:10.1097/WCO.0b013e32834c3db0
- Reis, J., Schambra, H. M., Cohen, L. G., Buch, E. R., Fritsch, B., Zarahn, E., ... Krakauer, J. W. (2009). Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(5), 1590-1595. doi:10.1073/pnas.0805413106
- Robertson, E. M. (2007). The Serial Reaction Time Task: Implicit Motor Skill Learning? *J. Neurosci.*, *27*(38), 10073-10075. doi:10.1523/JNEUROSCI.2747-07.2007
- Saucedo Marquez, C. M., Zhang, X., Swinnen, S. P., Meesen, R. et Wenderoth, N. (2013). Task-specific effect of transcranial direct current stimulation on motor learning. *Frontiers in human neuroscience*, *7*, 333. doi:10.3389/fnhum.2013.00333
- Savic, B. et Meier, B. (2016). How Transcranial Direct Current Stimulation Can

- Modulate Implicit Motor Sequence Learning and Consolidation : A Brief Review. *Frontiers in human neuroscience*, 10(February). doi:10.3389/fnhum.2016.00026
- Schambra, H. M., Abe, M., Luckenbaugh, D. A., Reis, J., Krakauer, J. W. et Cohen, L. G. (2011). Probing for hemispheric specialization for motor skill learning : a transcranial direct current stimulation study. *Journal of neurophysiology*, 652-661. doi:10.1152/jn.00210.2011.
- Schlerf, J. E., Galea, J. M., Bastian, A. J. et Celnik, P. A. (2012). Dynamic Modulation of Cerebellar Excitability for Abrupt , But Not Gradual , Visuomotor Adaptation. *The Journal of Neuroscience*, 32(34), 11610-11617. doi:10.1523/JNEUROSCI.1609-12.2012
- Schoemaker, M. M. et Smits-engelsman, B. C. M. (2015). Is Treating Motor Problems in DCD Just a Matter of Practice and More Practice ? *Current Developmental Disorders Reports*, 2, 150-156. doi:10.1007/s40474-015-0045-7
- Shelley A. Goodgold-Edwards, S. A. C. (1990). Integrating Motor Control and Motor Learning Concepts With Neuropsychological Perspectives on Apraxia and Developmental Dyspraxia. *American Journal of Occupational Therapy*, 44, 431-439.
- Shimizu, R. E., Wu, A. D., Samra, J. K., Knowlton, B. J. et Knowlton, B. J. (2017). The impact of cerebellar transcranial direct current stimulation ( tDCS ) on learning fine-motor sequences. *Philosophical Transactions*, 372, 1-10.
- Shmuelof, L., Krakauer, J. W. et Mazzoni, P. (2012). How is a motor skill learned ? Change and invariance at the levels of task success and trajectory control. *Journal Neurophysiology*, 108, 578-594. doi:10.1152/jn.00856.2011
- Smits-Engelsman, B. C. M., Blank, R., Van Der Kaay, A.-C., Mosterd-Van Der Meijjs, R., Vlugt-Van Den Brand, E., Polatajko, H. J. et Wilson, P. H. (2013). Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder: a combined systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 229–237. doi:10.1111/dmcn.12008
- Smits-Engelsman, B. C. M., Wilson, P. H., Westenberg, Y. et Duysens, J. (2003). Fine motor deficiencies in children with developmental coordination disorder and learning disabilities : An underlying open-loop control deficit. *Human kinetics Publishers*, 22, 495-513. doi:10.1016/j.humov.2003.09.006
- Soltaninejad, Z., Nejati, V. et Ekhtiari, H. (2015). Effect of Anodal and Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation on DLPFC on Modulation of Inhibitory Control in ADHD. doi:10.1177/1087054715618792
- Stagg, C. J., Jayaram, G., Pastor, D., Kincses, Z. T., Matthews, P. M. et Johansen-berg, H. (2011). Neuropsychologia Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning. *Neuropsychologia*, 49(5), 800-804. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.009
- Stagg, C. J. et Nitsche, M. A. (2014). Neuroscientist Physiological Basis of Transcranial

- Direct Current Stimulation. doi:10.1177/1073858410386614
- Swaine, B. R., Lortie, É. et Gravel, D. (2005). The reliability of the time to execute various forms of the Finger-to-Nose Test in healthy subjects. *Physiotherapy Theory and Practice*, 21(4), 271-279. doi:10.1080/09593980500321119
- Thibaut, A., Chatelle, C., Gosseries, O., Laureys, S. et Bruno, M. A. (2013). La stimulation transcrânienne à courant continu : un nouvel outil de neurostimulation. *Revue Neurologique*, 169(2), 108-120. doi:10.1016/j.neurol.2012.05.008
- Tseng, Y., Krakauer, J. W., Shadmehr, R. et Bastian, A. J. (2007). Sensory Prediction Errors Drive Cerebellum-Dependent Adaptation of Reaching. *Journal of neurophysiology*, 98, 54-62. doi:10.1152/jn.00266.2007.
- Vaivre-Douret. (2007). Troubles d'apprentissage non verbal : les dyspraxies développementales Non-verbal learning disabilities : developmental dyspraxia. *Archives de pédiatrie*, 14, 1341-1349. doi:10.1016/j.arcped.2007.06.034
- Walker, M. P., Brakefield, T. et Hobson, J. A. (2003). Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature Publishing Group*, 425, 8-12. doi:10.1038/nature01951.1.
- Williams, S. M. (1991). Handedness inventories: Edinburgh versus Annett. *Neuropsychology*, 5(1), 43-48. doi:10.1037/0894-4105.5.1.43
- Wilson, B., Pollock, N., Bonnie, J., Law, M. et Faris, P. (1992). Reliability and Construct Validity of the Clinical and Postural Skills. *The American journal of occupational therapy*, 46, 775-783.
- Wilson, P. H., Maruff, P. et Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder, 22, 515-526. doi:10.1016/j.humov.2003.09.007
- Wuang, Y. P., Su, J. H. et Su, C. Y. (2012). Reliability and responsiveness of the Movement Assessment Battery for Children-Second Edition Test in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 54(2), 160-165. doi:10.1111/j.1469-8749.2011.04177.x
- Wulf, G., Shea, C. et Lewthwaite, R. (2010). motor skill learning Motor skill learning and performance : a review of influential factors. *Medical Education*, 44, 75-84. doi:10.1111/j.1365-2923.2009.03421.x
- Young, S. J., Bertuccio, M. et Sanger, T. D. (2014). Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation in Children With Dystonia : A Sham-Controlled Study, 29(2), 232-239. doi:10.1177/0883073813492385
- Zimmerman, M., Heise, K. F., Hoppe, J., Cohen, L. G., Gerloff, C., Hummel, F. C., ... Disorders, N. (2012). HHS Public Access. *Stroke*, 43(8), 2185-2191. doi:10.1161/STROKEAHA.111.645382.Modulation
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. (2010). Brain Activation of Children With Developmental Coordination Disorder Is Different Than Peers.

- Pediatrics*, 126(3), e678-e686. doi:10.1542/peds.2010-0059
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. A. (2011). Brain activation associated with motor skill practice in children with developmental coordination disorder: An fMRI study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 29(2), 145-152. doi:10.1016/j.ijdevneu.2010.12.002
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. A. (2012). Developmental coordination disorder: A review and update. *European Journal of Paediatric Neurology*, 16(6), 573-581. doi:10.1016/j.ejpn.2012.05.005

## **Chapitre 6 : Discussion**

Cette étude avait comme objectif d'évaluer l'efficacité de la SCD au niveau du cervelet sur l'apprentissage moteur et la coordination motrice des enfants ayant un TAC. Nos résultats montrent que la SCD tend à réduire le taux d'erreur lors de la tâche de pianotage, sans qu'il y ait une différence statistiquement significative. Ainsi, les enfants des deux groupes font moins d'erreur à la fin des sessions qu'au début. De même, une amélioration significative de la vitesse de réaction et de la coordination motrice a été observée pour tous les participants, sans effet de groupe. Ces résultats peuvent être influencés par plusieurs biais et limites suite à la randomisation ou aux procédures de la collecte des données, ceci est abordé en détails dans les sections suivantes.

L'application de la SCD pourrait améliorer l'apprentissage moteur et la fonction motrice chez plusieurs populations (Ciechanski et Kirton, 2016; Ferrucci *et al.*, 2016; Hashemirad *et al.*, 2016; Thibaut *et al.*, 2013), mais à notre connaissance, il s'agit de la première étude chez les enfants ayant un TAC. Nous comparons donc nos résultats avec des études faites chez les sujets adultes sains ou des personnes ayant des maladies/troubles dont la physiopathologie est semblable au TAC, tel que la paralysie cérébrale de type ataxique et l'ataxie cérébelleuse. En effet, ces maladies présentent un déficit cérébelleux résultant d'une anomalie de l'activité neuronale au niveau du cervelet (Grecco et al., 2017).

### **6.1. Apprentissage moteur : Taux d'erreur et vitesse de réaction**

Le taux d'erreur et la vitesse de réaction sont utilisés pour mesurer l'apprentissage moteur autant chez les populations adultes que chez les enfants (Ciechanski et Kirton, 2016; Shishov et al., 2017).

#### **6.1.1. Taux d'erreur**

La précision mesurée par le taux d'erreur lors de la réalisation d'une tâche est l'une des composantes principales pour évaluer le changement au niveau de l'apprentissage moteur. La réduction du taux d'erreur pourrait s'expliquer plus particulièrement par une réduction de la variabilité (Shmuelof et al., 2012). La réduction de la variabilité de

mouvement est un marqueur de l'amélioration de la performance et de l'adaptation motrice (Shishov et al., 2017). Cette réduction de la variabilité est obtenue suite à des améliorations dans l'exécution et à une minimisation des erreurs, qui amènent à un mouvement plus stable et efficace.

Les résultats de notre étude montrent une tendance à améliorer le taux d'erreur suite à l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet, sans que cette différence soit statistiquement significative ( $p=0,072$ ). Ces résultats sont similaires à ceux d'autres études ayant rapporté que l'application de la SCD au niveau du cervelet améliore l'apprentissage moteur en réduisant le taux d'erreur (Cantarero et al., 2015; Ehsani et al., 2016; Ferrucci et al., 2013; Galea et al., 2011). Notamment, Cantarero et ses collègues ont montré que la SCD appliquée au niveau du cervelet chez les adultes sains améliore l'apprentissage en réduisant significativement le taux d'erreur (Cantarero et al., 2015). De même, Ehsani et ses collègues (2016) ont trouvé une réduction significative du taux d'erreur suite à la pratique de la SRTT pour le groupe actif comparé au groupe placebo. Il est à noter que dans notre étude, tous les participants ont eu une augmentation du taux d'erreur à l'intérieur des séances, soit en comparant le dernier bloc par rapport au premier ( $p=0.002$ ). Cette augmentation était plus marquée pour les enfants du groupe placebo en comparaison aux enfants du groupe expérimental. Cette augmentation du taux d'erreur dans le groupe sans SCD pourrait s'expliquer par, d'une part l'effet d'être plus rapide, et d'autre part, la fatigue présente à la fin de la séance, ce qui prédispose à faire plus d'erreurs. Nos résultats ont confirmé l'effet sur la réduction de la fatigue apparaissant à la fin de la session. En effet, une réduction du taux d'erreur dans le groupe expérimental comparé au groupe contrôle a été notée. Cette observation avait également été rapportée dans une étude antérieure (Xu et al., 2015). Xu et ses collègues ont en effet montré que l'application bilatérale de la SCD anodale au niveau du cortex frontal chez des adultes sains réduit le stress et l'effet de fatigue (2015).

En résumé, nos résultats sont supportés par d'autres résultats antérieurs montrant que la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet contribue à réduire le taux d'erreur lors d'une tâche d'apprentissage motrice (Ferrucci et al., 2013; Galea et al., 2011). Certains auteurs expliquent ces résultats par une meilleure adaptation en fonction du temps, les participants devenant ainsi plus rapides tout en faisant moins d'erreurs

(Ferrucci et al., 2013; Galea et al., 2011; Jayaram et al., 2012). Ces résultats seraient liés au rôle connu du cervelet dans le processus d'adaptation dans les réactions motrices (Tseng et al., 2007). Il est ainsi fréquent qu'une amélioration de l'adaptation motrice soit mise en évidence par une réduction de taux d'erreur suite à des perturbations ou des stimulations externes (Galea et al., 2011; Jayaram et al., 2012).

### **6.1.2. Vitesse de réaction**

Bien qu'aucune différence statistiquement significative n'ait été trouvée entre les groupes, les résultats de la présente étude ont montré que tous les enfants ayant un TAC se sont plus rapides avec la pratique. Leur vitesse de réaction à la SRTT s'est améliorée significativement entre les blocs d'une même séance, et d'une séance à l'autre. Par conséquent, l'augmentation de la rapidité d'exécution trouvée dans notre étude s'explique probablement par un effet de pratique. En effet, lors de chaque session, tous les participants ont réagi plus rapidement lors de la présentation des stimuli dans le dernier bloc par rapport au premier. Nos résultats concordent avec plusieurs études évaluant l'apprentissage moteur et utilisant la SRTT (Gheysen et al., 2011; Lejeune et al., 2014; Wilson et al., 2003). Suite à l'analyse de nos résultats, nous pouvons conclure que les enfants ayant un TAC s'améliorent au niveau de la vitesse de réaction avec la pratique de la tâche de pianotage. En particulier, ces résultats sont en accord avec les résultats de l'étude de Lejeune et ses collègues (2013) qui ont montré que les enfants ayant un TAC s'améliore de façon similaire aux enfants ayant un développement typique quant à la vitesse de réaction suite à la pratique de la tâche de pianotage. En accord avec nos résultats, Cantarero et ses collègues (2015) n'ont pas trouvé d'effet statistiquement significatif de la SCD chez les adultes en santé quant à la vitesse de réaction, bien que les participants des deux groupes se soient améliorés en fonction du temps. Ces améliorations témoigneraient davantage d'un effet de pratique que d'un effet de la SCD. Toutefois, des études récentes ont rapporté des résultats différents. En effet, les études de Ferrucci et al. (2013) et Ehsani et al. (2016) ont trouvé une amélioration statistiquement significative de l'apprentissage moteur suite à l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet, durant une tâche de SRTT, chez des adultes sains. Considérant que leur population ne présente pas de déficits neurophysiologiques, il est possible que la SCD améliore l'apprentissage moteur via les processus neurologique et biochimique sous-jacents. Ainsi, les résultats non significatifs de notre étude pourraient

être expliqués par la possibilité d'un dysfonctionnement physiopathologique (neuronale ou biochimique) chez les enfants ayant un TAC, ce qui pourrait empêcher l'effet neurophysiologique de la SCD. Toutefois, l'effet principal de session et de bloc, c'est-à-dire l'amélioration de la vitesse de réponse en fonction du temps pour l'échantillon complet, tend à confirmer que la tâche de pianotage pratiquée simultanément lors de l'application de la SCD serait un bon outil pour améliorer l'apprentissage moteur chez les enfants ayant un TAC. Cette conclusion est supportée par une étude menée chez les enfants neurotypiques d'âge scolaire (Thomas et Nelson, 2001). En effet, Thomas et Nelson ont mis en évidence l'efficacité de la tâche de pianotage SRTT pour évaluer l'acquisition de l'apprentissage moteur chez les enfants d'âge scolaire et préscolaire (Thomas et Nelson, 2001). Par ailleurs, il est important de noter que l'application de la SCD au niveau du cervelet a montré un meilleur effet d'apprentissage chez la population adulte saine lorsqu'elle est appliquée simultanément à la pratique de l'exercice moteur en comparaison à la pratique de l'exercice après l'application de la SCD (Ammann et al., 2016; Stagg et al., 2011).

L'effet de neurostimulation par la SCD dépend de plusieurs éléments tels que la région stimulée, les paramètres de l'application de la stimulation (intensité, durée, densité du courant...) et le nombre des sessions (Ammann et al., 2016). Le cortex moteur primaire (M1) étant impliqué dans le processus d'apprentissage moteur, dont notamment dans la rétention, plusieurs études ont rapporté une amélioration de l'apprentissage moteur suite à l'application de la SCD au cortex moteur (Cuypers et al., 2013; Hashemirad et al., 2016; Reis et al., 2009; Saucedo Marquez et al., 2013). L'amélioration de l'apprentissage moteur suite à la SCD anodale est observée par une augmentation de l'activité neuronale au niveau du cortex moteur primaire (Hummel et Cohen, 2006; López-alonso et al., 2015; Reis et Fritsch, 2011). Des études antérieures ont comparé l'efficacité de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet à celle appliquée au M1; celles-ci ont montré que la SCD au niveau du cervelet améliore l'acquisition (observée par la réduction de nombre d'erreur) alors que, lorsqu'elle est appliquée au niveau du M1, la SCD a un meilleur effet sur la rétention (Ehsani et al., 2016; Galea et al., 2011). Par ailleurs, Kirton et ses collègues (2016) ont montré une amélioration de l'acquisition et de la rétention de l'apprentissage moteur suite à trois

sessions de 20 minutes de SCD anodale appliquée au niveau du cortex moteur des enfants en bonne santé (Ciechanski et Kirton, 2016).

### **6.1.3. Les facteurs combinés influençant l'apprentissage moteur et l'efficacité de la SCD chez les enfants ayant un TAC**

Différentes études semblent confirmer l'efficacité de l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet, et l'implication de cette structure dans les différents processus d'apprentissage moteur. Cependant, les modalités de pratique de la SRTT restent peu décrites dans les procédures expérimentales de ces études. Pourtant, plusieurs caractéristiques peuvent influencer considérablement l'apprentissage moteur tels que la région stimulée et la modalité de pratique de la tâche (soit la pratique simultanée ou après l'application de la stimulation), ainsi que les caractéristiques personnelles du participant. L'efficacité de la SCD sur l'apprentissage moteur dépend également des caractéristiques des participants (ex. la fatigabilité accrue des enfants ayant un TAC) et de nombreux autres facteurs, tels que la motivation (Wulf et al., 2010; Zwicker et al., 2010). Il a été démontré que les enfants ayant un TAC ont un taux d'anxiété élevé et éprouvent de la fatigue physique et cognitive suite aux efforts liés à l'exécution et à la planification de tâches motrice (Zwicker et al., 2010), ce qui peut affecter la motivation et la persévérance des participants (Pratt et Hill, 2011). Selon notre observation dans la présente étude, le niveau de motivation pendant la pratique de la SRTT variait d'un enfant à l'autre. Ce facteur pourrait avoir influencé les résultats obtenus. Malheureusement, nous n'avons pas mesuré cette variable de façon objective. De même, bien que nous ayons proposé aux participants une pause entre les blocs de SRTT, certains ont éprouvés de la fatigue dans les derniers blocs, ce qui pourrait avoir influencé la rapidité et le taux d'erreur de la SRTT (manuscrit en préparation). Encore ici, nous n'avons malheureusement pas mesuré la variable fatigue auprès de nos participants. Cependant, le choix de la mesure de l'apprentissage moteur, i.e. la tâche de pianotage SRTT, est connue pour avoir un effet minimisant les facteurs étrangers tels que la fatigue et la motivation (Robertson, 2007). La SRTT a également été montrée efficace pour mesurer le taux d'apprentissage des enfants ayant un TAC (Gheysen et al., 2011; Lejeune et al., 2013; Wilson et al., 2003) et semble donc une tâche appropriée pour évaluer l'apprentissage moteur.

Un élément important à considérer est également l'âge de nos participants. Il est possible que les adultes en bonne santé aient un meilleur processus d'apprentissage moteur que des enfants ayant des troubles neurodéveloppementaux, surtout lorsque ceux-ci présentent d'autres comorbidités (comme le TDAH) qui peuvent affecter l'activité neuronale. Il a en effet été démontré que l'activité neuronale peut être influencée par des facteurs tels que l'âge et le sexe (Dun et al., 2016). De plus, bien que nous ayons exclu tous les participants qui prenaient des psychoactifs et des antidépresseurs, nous n'avons pas documenté si les participants en avaient consommés récemment, ce qui aurait pu influencer l'excitabilité neuronale, et donc l'apprentissage moteur. En effet, la SCD améliore l'apprentissage moteur à travers le mécanisme de LTP (Long Term Potentiation) qui est lié à un processus chimique et synaptique entraînant une augmentation de l'excitabilité neuronale pouvant être mesurée par les potentiels évoqués moteurs. Ce mécanisme d'action sur l'activité neuronale, les régions stimulées et les voies impliquées suite à l'application de la SCD sont non connus chez les enfants ayant un TAC. Il apparaît donc important d'étudier le mécanisme sous-jacent et l'effet neurophysiologique de la SCD chez les enfants ayant un TAC.

Enfin, malgré l'absence de résultats significatifs, notre étude montre que l'application de la SCD anodale pendant trois sessions appliquée au niveau du cervelet ne résulte pas en des améliorations sur l'apprentissage moteur. Par ailleurs, Reis et ses collègues (2009) et de Monte-silva et ses collègues (2013) ont montré que l'efficacité de la SCD est meilleure en augmentant le nombre de séances, ceci lors de la stimulation du M1. Jusqu'à présent, peu d'études ont décrit les meilleures modalités d'application de la SCD au niveau du cervelet. Il est possible que l'augmentation du nombre de sessions de la SCD au niveau du cervelet puisse également améliorer l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC.

## **6.2. Fonctionnement : Coordination motrice**

La présente étude a aussi évalué l'efficacité de la SCD anodale sur la coordination motrice du membre supérieur des enfants ayant un TAC. Les résultats de la SCD appliquée au niveau du cervelet ne montrent pas une efficacité sur la coordination motrice du membre supérieur mesurée par le TDN. Cependant, tous les participants montrent une amélioration de la vitesse de la réalisation du TDN en fonction du temps,

d'une séance à l'autre, dûe probablement à un effet de pratique de la tâche. À notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'efficacité de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet sur la coordination motrice des adultes ou des enfants sains, ou ayant un TAC. Nos résultats peuvent cependant être comparés avec des études faites sur des personnes ayant une ataxie cérébelleuse, étant donné que l'ataxie est une pathologie qui touche le système nerveux et entraîne un trouble de coordination motrice. Grimaldi et Manto (2013) ont montré que l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet n'a pas d'effet sur la coordination motrice mesurée par le MCT (Mechanical Counter Test), un test qui quantifie le niveau fonctionnel des membres supérieurs des adultes ataxiques (Grimaldi et Manto, 2013). D'autre part, une étude récente faite sur des adultes ayant une ataxie neurodégénérative montre que l'application de la SCD anodale sur une période de deux semaines (à une fréquence de cinq jours par semaine) au niveau du cervelet améliore le score global SARA (Scale for the Assessment and Rating of Ataxia). Celui-ci évalue le niveau des performances motrices des personnes ataxiques en utilisant une batterie d'évaluation dont le TDN fait parti (Benussi et al., 2016). À noter toutefois que les auteurs n'ont pas évalué spécifiquement les résultats du TDN. Une autre étude a évalué l'effet de la SCD anodale appliquée au niveau du cervelet lors de l'entraînement sur tapis roulant afin d'améliorer la motricité globale et la coordination chez les enfants ayant une paralysie cérébrale de type ataxique (Grecco et al., 2017). Les résultats ont montré une amélioration au niveau de l'équilibre statique, mais sans effet sur la performance motrice fonctionnelle chez ces enfants (Grecco et al., 2017). En résumé, malgré que l'implication du cervelet dans la coordination motrice ait été documentée dans les études antérieures (Glickstein, Strata et Voogd, 2009; Ramnani et al., 2001), de nouvelles recherches sont nécessaires afin de clarifier son rôle dans la coordination des enfants ayant un TAC et d'explorer la physiopathologie de ce trouble chez ces derniers. De même, la validité et la sensibilité du TDN pour évaluer la coordination motrice des membres supérieurs des enfants ayant un TAC et les changements suivant l'application de la SCD demeurent à démontrer. Plus de Recherche sur les paramètres et les différentes modalités d'application de la SCD sont également nécessaires avant de pouvoir l'utiliser auprès des enfants ayant un TAC.

### **6.3. Utilisation sécuritaire de la SCD**

Puisque notre étude est exploratoire, il est important de mentionner que l'application de la SCD chez les enfants ayant un TAC est sécuritaire, et qu'aucun effet indésirable majeur n'a été observé. Les effets secondaires notés les plus communs sont une rougeur transitoire au site de stimulation ou une sensation de fatigue légère. Cette application est non-invasive et indolore, la majorité des participants ne différencie pas s'ils ont reçu le vrai courant ou la stimulation placebo (manuscrit en préparation). Ces résultats sont extraits d'une étude parallèle menée par des étudiants en physiothérapie, dans le but d'évaluer les effets secondaires et la faisabilité de l'application de la SCD chez les enfants ayant un TAC.

#### **6.4. Influence des caractéristiques des participants**

Tous les participants à notre étude présentaient des difficultés motrices, selon leur score de MABC-2, mais 60% de notre échantillon présentent des difficultés motrices moyennes à légères (i.e. score de MABC-2 > 5 percentile). Le niveau des difficultés motrices de nos participants pourrait avoir influencé les résultats de l'étude. En effet, la SCD pourrait avoir une meilleure efficacité lorsqu'elle est appliquée auprès d'une population qui présente des difficultés motrices sévères (Thibaut *et al.*, 2013). L'application de la SCD pourrait potentiellement être plus efficace chez les enfants ayant un TAC qui présentent des difficultés motrices sévères (< 5 percentile).

De plus, les facteurs personnels non contrôlés tels que la motivation et l'anxiété peuvent avoir affecté les résultats de l'apprentissage moteur tel que mentionné antérieurement dans la section sur l'apprentissage moteur.

#### **6.5. Limites et forces du projet de recherche**

Cette étude exploratoire présente certaines limites qui peuvent entraîner certains biais qui pourraient être pris en considération pour les recherches futures. Tout d'abord, bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les deux groupes, certaines caractéristiques diffèrent entre les deux groupes. En plus des différences sur le plan des difficultés de coordination motrice, le nombre d'enfant ayant un TDAH est différent entre les deux groupes. Or, l'efficacité de la SCD au niveau du cervelet chez les enfants ayant un TDAH est inconnue. Il est possible les enfants ayant un TDAH et un TAC ne répondent pas de la même façon que les enfants ayant uniquement un TAC. Il serait

probablement important de considérer ce facteur dans les prochaines études. La petite taille de notre échantillon ne nous a pas permis d'explorer l'influence du TDAH ou d'autres facteurs, comme l'âge, qui peuvent influencer l'apprentissage moteur, ainsi qu'une éventuelle stratification des groupes selon leurs niveaux de difficultés motrices. De même, la comparaison de nos résultats avec des études faites chez les adultes pourrait limiter la qualité de la discussion, puisqu'il est probable que les enfants et les adultes ne répondent pas de la même façon à la SCD. Par ailleurs, bien que le même chercheur ait installé les électrodes pour tous les participants, il a auparavant été démontré qu'une électrode placée dans une position légèrement différente pourrait induire un effet différent (Priori et al., 2014) et par conséquent pourrait influencer l'efficacité de la SCD. Bien que la réduction du signal BOLD soit communément interprétée façon simpliste comme reflétant le niveau d'activité neuronale, ce lien demeure en grande partie spéculatif et dépend grandement du contexte (Butler, Bernier, Lefebvre, Gilbert et Whittingstall, 2017). Ainsi, bien qu'on puisse statuer sur la présence d'anomalies cérébelleuses dans le TAC, il n'est pas possible, à la lumière des connaissances actuelles, de se prononcer sur la direction de celles-ci. Pour y remédier, des études futures pourraient utiliser la stimulation cathodale qui présumée réduire l'excitabilité neuronale (Shimizu, Wu, Samra, Knowlton et Knowlton, 2017), comme condition contrôle afin d'établir plus clairement les effets de l'augmentation et de la diminution de l'excitabilité neuronale cérébelleuse dans l'apprentissage moteur au sein du TAC.

Cette étude a une bonne validité interne par la rigueur de son protocole. Elle a été effectuée en double insu afin de limiter d'éventuels biais, soit des participants soit de l'évaluateur. Tous les participants ont été randomisés dans le groupe actif ou dans le groupe placebo. La fidélité inter-évaluateur a été conservée tout au long de l'étude; à titre d'évaluatrice, j'ai collecté toutes les données et j'ai installé les électrodes avant chaque session de SCD pour tous les participants afin de limiter le biais inter-évaluateur. Ce projet a été réalisé en collaboration avec des étudiants en physiothérapie, qui ont appliqué le courant à l'insu de l'évaluateur et du participant, ainsi qu'avec un expert en neurostimulation et des professeurs chercheurs en réadaptation.

## **6.6. Perspectives futures du présent projet de recherche**

L'impact de la SCD sur l'apprentissage moteur nécessite d'être exploré chez les enfants atteints de TAC. Cet outil neuromodulateur pourrait permettre d'explorer et éventuellement d'intervenir sur la neuropathologie des troubles moteurs chez les enfants ayant un TAC. La SCD pourrait éventuellement être un outil thérapeutique associé aux interventions thérapeutiques actuelles, potentiellement en modifiant certains paramètres (comme la tâche motrice pratiquée pendant l'application de la SCD, le type de courant). La suggestion récente de Grecco et al. (2017) de combiner un entraînement physique intensif avec l'application de la SCD anodale au niveau du cervelet pourrait être intéressante pour faciliter l'apprentissage et la performance motrice globale de ces enfants. Des futures recherches sont recommandées pour explorer l'effet des différentes modalités et paramètres de stimulation afin d'améliorer l'apprentissage et la coordination des enfants atteints de TAC. Par ailleurs, la présente étude montre que la SCD pourrait avoir une tendance d'une efficacité sur l'apprentissage moteur. Les mécanismes sous-jacents demeurent cependant peu connus. D'autres études sont nécessaires pour explorer le changement d'excitabilité neuronale dans le cervelet après l'application de la SCD. D'autres régions cérébrales impliquées dans l'apprentissage moteur, comme le cortex moteur primaire, qui est particulièrement impliqué dans la rétention, pourraient être stimulées pour améliorer l'apprentissage moteur dans ses différentes phases et maximiser les gains moteurs des enfants ayant un TAC.

## Conclusion

L'apprentissage moteur est un élément indispensable dans le développement de l'enfant. Cet apprentissage est particulièrement important chez l'enfant ayant un TAC, afin de lui permettre d'acquérir les habilités nécessaires pour une meilleure performance motrice lors des activités quotidiennes, comme la pratique de sport ou l'écriture.

Cette étude a démontré que l'application de la SCD au niveau de cervelet ne semble pas avoir un effet sur l'apprentissage moteur malgré la présence d'une tendance à avoir une réduction du taux d'erreur pour le groupe ayant reçu la stimulation active. Cette amélioration peut être la résultante d'une augmentation de l'activité neuronale au niveau de cervelet et confirmer l'implication de cette structure cérébrale dans l'apprentissage moteur des enfants ayant un TAC. Une exploration rigoureuse est nécessaire pour clarifier le mécanisme neurophysiologique non seulement de la région du cervelet mais d'autres régions cérébrales impliquées dans l'apprentissage moteur.

L'application de la SCD pourrait devenir un outil thérapeutique intéressant qui contribuera à l'amélioration des performances motrices en complément aux traitements cliniques actuels pour les enfants ayant un TAC.

## Liste des références

- Adams, J. A., Gopher, D. et Lintern, G. (1975). The Effects of Visual and Proprioceptive Feedback on Motor Learning. *Sage Journal*, 19(2), 162-165. doi:10.1177/154193127501900204
- Amatachaya, A., Auvichayapat, N., Patjanasootorn, N., Suphakunpinyo, C., Ngernyam, N., Aree-uea, B., ... Auvichayapat, P. (2014). Effect of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation on Autism : A Randomized Double-Blind Crossover Trial, 2014.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5e édition)*. doi:10.1016/B978-1-4377-2242-0.00016-X
- Benussi, A., Era, V. D., Cotelli, M. S., Turla, M., Casali, C., Padovani, A. et Borroni, B. (2016). Long term clinical and neurophysiological effects of cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with neurodegenerative ataxia. *Brain Stimulation*. doi:10.1016/j.brs.2016.11.001
- Bikson, M., Inoue, M., Akiyama, H., Deans, J. K., Fox, J. E., Miyakawa, H. et Jefferys, J. G. R. (2004). Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *The physiology Society*, 1, 175-190. doi:10.1113/jphysiol.2003.055772
- Biotteau, M., Chaix, Y. et Albaret, J.-M. (2016). What Do We Really Know About Motor Learning in Children with Developmental Coordination Disorder? *Current Developmental Disorders Reports*. doi:10.1007/s40474-016-0084-8
- Blank, R., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H. et Wilson, P. (2012). European Academy for Childhood Disability (EACD): Recommendations on the definition, diagnosis and intervention of developmental coordination disorder (long version). *Developmental Medicine and Child Neurology*, 54(1), 54-93. doi:10.1111/j.1469-8749.2011.04171.x
- Boggio, P. S., Ferrucci, R., Rigonatti, S. P., Covre, P., Nitsche, M., Pascual-Leone, A. et Fregni, F. (2006). Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 249(1), 31-38. doi:10.1016/j.jns.2006.05.062
- Brown, T. et Lalor, A. (2009). The Movement Assessment Battery for Children—Second Edition (MABC-2): A Review and Critique. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 29(1), 86-103. doi:10.1080/01942630802574908
- Brown-Lum, M. et Zwicker, J. G. (2015). Brain Imaging Increases Our Understanding of Developmental Coordination Disorder: a Review of Literature and Future Directions. *Current Developmental Disorders Reports*, 2(2), 131-140. doi:10.1007/s40474-015-0046-6
- Buch, E. R., Santarnecchi, E., Antal, A., Born, J., Celnik, P. A., Gerloff, C., ... Eric, M. (2017). Effects of tDCS on motor learning and memory formation : a consensus

- and. *Clinical Neurophysiology*. doi:10.1016/j.clinph.2017.01.004
- Butler, X. R., Bernier, P., Lefebvre, J., Gilbert, G. et Whittingstall, K. (2017). Decorrelated Input Dissociates Narrow Band  $\alpha$  Power and BOLD in Human Visual Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 37(22), 5408-5418. doi:10.1523/JNEUROSCI.3938-16.2017
- Cairney, J., Kwan, M. Y. W., Hay, J. A. et Fought, B. E. (2012). Research in Developmental Disabilities Developmental Coordination Disorder , gender , and body weight : Examining the impact of participation in active play. *Research in Developmental Disabilities*, 33(5), 1566-1573. doi:10.1016/j.ridd.2012.02.026
- Cantarero, G., Spampinato, D., Reis, J., Ajagbe, L., Thompson, T., Kulkarni, K. et Celnik, P. (2015). Cerebellar direct current stimulation enhances on-line motor skill acquisition through an effect on accuracy. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 35(7), 3285-90. doi:10.1523/JNEUROSCI.2885-14.2015
- Cantarero, G., Tang, B., O'Malley, R., Salas, R. et Celnik, P. (2013). Motor learning interference is proportional to occlusion of LTP-like plasticity. *The Journal of Neuroscience*, 33(11), 4634-4641. doi:10.1523/JNEUROSCI.4706-12.2013
- Celnik, P. A., Nam-Jong, P., Vandermeeren, Y., Dimyan, M. et Cohen, L. G. (2009). Effects of combined peripheral nerve stimulation and brain polarization on performance of a motor sequence task after chronic stroke. *Stroke*, 40(5), 1764-1771. doi:10.1161/STROKEAHA.108.540500.
- Chow, S. M. K. et Henderson, S. E. (2003). Interrater and Test – Retest Reliability of the Movement Assessment Battery for Chinese Preschool Children. *American Journal of Occupational Therapy*, 57(5), 574-577.
- Ciechanski, P. et Kirton, A. (2016). Transcranial Direct-Current Stimulation Can Enhance Motor Learning in Children. *Cerebral Cortex*, 1-10. doi:10.1093/cercor/bhw114
- Debrabant, J., Gheysen, F., Caeyenberghs, K., Van Waelvelde, H. et Vingerhoets, G. (2013). Neural underpinnings of impaired predictive motor timing in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1478-1487. doi:10.1016/j.ridd.2013.02.008
- Debrabant, J., Vingerhoets, G., Van Waelvelde, H., Leemans, A., Taymans, T. et Caeyenberghs, K. (2015). Brain Connectomics of Visual-Motor Deficits in Children with Developmental Coordination Disorder. *The Journal of pediatrics*, 169, 21-27.e2. doi:10.1016/j.jpeds.2015.09.069
- Destrebecqz, A., Peigneux, P., Laureys, S., Degueldre, C., Fiore, G. Del, Linden, M. Van Der, ... Maquet, P. (2005). The neural correlates of implicit and explicit sequence learning : Interacting networks revealed by the process dissociation procedure. *Learning and Memory*, (12), 480-490. doi:10.1101/lm.95605.6
- Dewey, D. et Bernier, F. P. (2016). The Concept of Atypical Brain Development in Developmental Coordination Disorder ( DCD ) — a New Look. *Current*

- Developmental Disorders Reports*, 3, 161-169. doi:10.1007/s40474-016-0086-6
- Doyon, J. et Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. doi:10.1016/j.conb.2005.03.004
- Doyon, J., Owen, A. M., Petrides, M., Sziklas, V. et Evans, A. C. (1996). Functional Anatomy of Visuomotor Skill Learning in Human Subjects Examined with Positron Emission Tomography, 8(March 1995).
- Dweck, C. S. et Leggett, E. L. (1988). A Social-Cognitive Approach to Motivation and Personality. *American Psychological Association*, 95(2), 256-273.
- Edwards, J., Berube, M., Erlandson, K., Haug, S., Johnstone, H., Meagher, M., ... Zwicker, J. G. (2011). Developmental Coordination Disorder in School-Aged Children Born Very Preterm and / or at Very Low Birth Weight : A Systematic Review. *journal of developmental and behavior pediatrics*, 32, 678-687.
- Ehsani, F., Bakhtiary, A. H., Jaberzadeh, S., Talimkhani, A. et Hajihassani, A. (2016). Differential effects of primary motor cortex and cerebellar transcranial direct current stimulation on motor learning in healthy individuals : A randomized double-blind sham-controlled study. *Neuroscience Research*, 112, 10-19. doi:10.1016/j.neures.2016.06.003
- Ferguson, G. D., Jelsma, J. et Versfeld, P. (2014). Using the ICF Framework to Explore the Multiple Interacting Factors Associated with Developmental Coordination Disorder. *Current Developmental Disorders Reports*, 86-101. doi:10.1007/s40474-014-0013-7
- Ferrucci, R., Bocci, T., Cortese, F., Ruggiero, F. et Priori, A. (2016). Cerebellar transcranial direct current stimulation in neurological disease. *Cerebellum & Ataxias*. doi:10.1186/s40673-016-0054-2
- Ferrucci, R., Brunoni, A. R., Parazzini, M., Vergari, M., Rossi, E., Fumagalli, M., ... Priori, A. (2013). Modulating human procedural learning by cerebellar transcranial direct current stimulation. *Cerebellum*, 12(4), 485-492. doi:10.1007/s12311-012-0436-9
- Ferrucci, R. et Priori, A. (2014). NeuroImage Transcranial cerebellar direct current stimulation ( tcDCS ): Motor control , cognition , learning and emotions. *NeuroImage*, 85, 918-923. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.04.122
- Fertonani, A., Ferrari, C. et Miniussi, C. (2015). What do you feel if I apply transcranial electric stimulation? Safety, sensations and secondary induced effects. *Clinical Neurophysiology*, 126(11), 2181-2188. doi:10.1016/j.clinph.2015.03.015
- Figlewski, K., Blicher, J. U., Mortensen, J., Severinsen, K. E., Nielsen, J. F. et Andersen, H. (2017). Transcranial Direct Current Stimulation Potentiates Improvements in Functional Ability in Patients With Chronic Stroke Receiving Constraint-Induced Movement Therapy. *Stroke*, 48(1), 1-5. doi:10.1161/STROKEAHA.116.014988
- Forsberg, H. (1999). Neural control of human motor development. *Neural control of*

- human motor development*, 9, 676-682.
- Frank, E., Wilfurth, S., Landgrebe, M., Eichhammer, P., Hajak, G. et Langguth, B. (2010). Anodal skin lesions after treatment with transcranial direct current stimulation. *Brain Stimulation*, 3(1), 58-59. doi:10.1016/j.brs.2009.04.002
- Fregni, F., Boggio, P. S., Santos, M. C., Lima, M., Vieira, A. L., Rigonatti, S. P., ... Pascual-leone, A. (2006). Noninvasive Cortical Stimulation With Transcranial Direct Current Stimulation in Parkinson ' s Disease, 21(10), 1693-1702. doi:10.1002/mds.21012
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K., Schambra, H. M., Ji, Y., Cohen, L. G. et Lu, B. (2010). Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: Potential implications for motor learning. *Neuron*, 66(2), 198-204. doi:10.1016/j.neuron.2010.03.035
- Galea, J. M., Jayaram, G., Ajagbe, L. et Celnik, P. (2009). Modulation of Cerebellar Excitability by Polarity-Specific Noninvasive Direct Current Stimulation. *Journal of Neuroscience*, 29(28), 9115-9122. doi:10.1523/JNEUROSCI.2184-09.2009
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., Orban De Xivry, J. J. et Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: The motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral Cortex*, 21(8), 1761-1770. doi:10.1093/cercor/bhq246
- Gandiga, P. C., Hummel, F. C. et Cohen, L. G. (2006). Transcranial DC stimulation (tDCS): A tool for double-blind sham-controlled clinical studies in brain stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 845-850. doi:10.1016/j.clinph.2005.12.003
- Gheysen, F., Van Waelvelde, H. et Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 749-756. doi:10.1016/j.ridd.2010.11.005
- Giordano, J., Bikson, M., Kappenman, E. S., Clark, V. P., Coslett, H. B., Hamblin, M. R., ... Wurzman, R. (2017). Mechanisms and Effects of Transcranial Direct Current Stimulation. *Dose-Response: An international Journal*, 1-22. doi:10.1177/1559325816685467
- Gomez, A. et Sirigu, A. (2015). Developmental coordination disorder: Core sensori-motor deficits, neurobiology and etiology. *Neuropsychologia*, 79, 272-287. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.032
- Goyen, T. et Lui, K. (2009). Developmental coordination disorder in “ apparently normal ” schoolchildren born extremely preterm. *Archives disabilities children*, 94, 298-302. doi:10.1136/adc.2007.134692
- Grecco, A. L. C., Oliveira, C. S., Almeida, N. De, Duarte, C., Lima, V. L. C. C., Zanon, N. et Fregni, F. (2017). Cerebellar transcranial direct current stimulation in children with ataxic cerebral palsy : A sham- controlled , crossover , pilot study. *Developmental Neurorehabilitation*, 20(3), 142-148. doi:10.3109/17518423.2016.1139639

- Grimaldi, G., Argyropoulos, G. P., Bastian, A., Cortes, M., Davis, N. J., Edwards, D. J., ... Celnik, P. (2014). Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation (ctDCS): A Novel Approach to Understanding Cerebellar Function in Health and Disease. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 1073858414559409-. doi:10.1177/1073858414559409
- Grimaldi, G. et Manto, M. (2013). Anodal Transcranial Direct Current Stimulation ( tDCS ) Decreases the Amplitudes of Long-Latency Stretch Reflexes in Cerebellar Ataxia. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(11), 2437-2447. doi:10.1007/s10439-013-0846-y
- Hardwick, R. M. et Celnik, P. A. (2014). Neurobiology of Aging Cerebellar direct current stimulation enhances motor learning in older adults. *Neurobiology of Aging*, 1-5. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2014.03.030
- Harris, S., Mickelson, E. et Zwicker, J. G. (2015). Diagnosis and management of developmental coordination disorder. *Canadian Medical Association Journal*, 187(9), 659-666.
- Hashemirad, F., Zoghi, M., Fitzgerald, P. B. et Jaberzadeh, S. (2016). The effect of anodal transcranial direct current stimulation on motor sequence learning in healthy individuals: A systematic review and meta-analysis. *Brain and Cognition*, 102, 1-12. doi:10.1016/j.bandc.2015.11.005
- Henderson, S. E., Sugden, D. A. et Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children (2nd ed.)*.
- Hermesen, A., Haag, A., Duddek, C., Balkenhol, K., Bugiel, H., Bauer, S., ... Rosenow, F. (2016). Test-retest reliability of single and paired-pulse transcranial magnetic stimulation parameters in healthy subjects. *Journal of the Neurological Sciences*, 362, 209-216. doi:10.1016/j.jns.2016.01.039
- Herzfeld, D. J., Pastor, D., Haith, A. M., Rossetti, Y., Shadmehr, R. et Shea, J. O. (2014). Contributions of the cerebellum and the motor cortex to acquisition and retention of motor memories. *NeuroImage*, 1053-8119. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.04.076
- Holsti, L., Grunau, R. et Whitfield, M. (2002). Developmental coordination disorder in extremely low birthweight children ( < = 800 Developmental Coordination Disorder in Extremely Low Birth Weight Children at Nine Years. *Pediatric Research*, 23(1), 8-15.
- Honda, M., Deiber, M., Iba, V., Pascual-leone, A., Zhuang, P. et Hallett, M. (1998). Dynamic cortical involvement in implicit and explicit motor sequence learning A PET study. *Brain*, 121, 2159-2173.
- Hummel, F. C. et Cohen, L. G. (2006). Non-invasive brain stimulation : a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke ?, 5(August), 708-712.
- Immink, M. A. et Wright, D. L. (2001). Motor Programming During Practice Conditions High and Low in Contextual Interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 423-437.

doi:10.1037//0096-1523.27.2.423

- Ito, M. (2000). Mechanisms of motor learning in the cerebellum. *Brain Research*, 886(1-2), 237-245. doi:10.1016/S0006-8993(00)03142-5
- Jayaram, G., Tang, B., Pallegadda, R., Vasudevan, E. V. L., Celnik, P. et Bastian, A. (2012). Modulating locomotor adaptation with cerebellar stimulation. *Journal of Neurophysiology*, 107(11), 2950-2957. doi:10.1152/jn.00645.2011
- Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L. et Clark, J. E. (2004). Visuomotor Adaptation in Children with Developmental Coordination Disorder. *Human kinetics Publishers*, 8(November), 450-460. doi:10.1123/mcj.8.4.450
- Kang, N., Summers, J. J. et Cauraugh, J. H. (2016). Transcranial direct current stimulation facilitates motor learning post-stroke : a systematic review and meta-analysis, 345-355. doi:10.1136/jnnp-2015-311242
- Kantak, S. S., Mummidisetty, C. K. et Stinear, J. W. (2012). Primary motor and premotor cortex in implicit sequence learning – evidence for competition between implicit and explicit human motor memory systems. *European Journal of Neuroscience*, 36(February), 2710-2715. doi:10.1111/j.1460-9568.2012.08175.x
- Kelly, R. M. et Strick, P. L. (2003). Cerebellar Loops with Motor Cortex and Prefrontal Cortex of a Nonhuman Primate. *The Journal of Neuroscience*, 23(23), 8432-8444.
- Kim, S., Stephenson, M. C., Morris, P. G. et Jackson, S. R. (2014). tDCS-induced alterations in GABA concentration within primary motor cortex predict motor learning and motor memory: A 7T magnetic resonance spectroscopy study. *NeuroImage*, 1053-8119. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.05.070
- Krishnan, C., Santos, L., Peterson, M. D. et Ehinger, M. (2015). Brain Stimulation Safety of Noninvasive Brain Stimulation in Children and Adolescents. *Brain Research*, 8, 76-87.
- Lage, M., Ugriniwitsh, H., Apolinario-Souza, T., Mario Vieira, M., Albuquerque, M. . et Novellino Benda, R. (2015). Repetition and variation in motor practice: a review of neural correlates Guilherme. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. doi:10.1016/j.neubiorev.2015.08.012
- Lane, H. et Brown, T. (2015). Scandinavian Journal of Occupational Therapy Convergent validity of two motor skill tests used to assess school-age children Convergent validity of two motor skill tests used to assess school-age children. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 22, 161-172. doi:10.3109/11038128.2014.969308
- Latash, M. L., Scholz, J. P. et Schöner, G. (2002). Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exercise & Sport Sciences Review*, 30(1), 26-31.
- Lejeune, C., Catale, C., Willems, S. et Meulemans, T. (2013). Intact procedural motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(6), 1974-1981. doi:10.1016/j.ridd.2013.03.017

- Lejeune, C., Wansard, M., Geurten, M. et Meulemans, T. (2014). Procedural learning , consolidation , and transfer of a new skill in Developmental Coordination Disorder. *Child Neuropsychology*, 2014(February 2015), 37-41. doi:10.1080/09297049.2014.988608
- Lepage, J.-F., Morin-Moncet, O., Beaulé, V., de Beaumont, L., Champoux, F. et Théoret, H. (2012). Occlusion of LTP-like plasticity in human primary motor cortex by action observation. *PloS one*, 7(6), e38754. doi:10.1371/journal.pone.0038754
- Levac, D., Wishart, L., Missiuna, C., Ont, O. et Wright, V. (2011). The Application of Motor Learning Strategies Within Functionally Based Interventions for Children with Neuromotor Conditions. *Pediatric Physical Therapy*, 345-355. doi:10.1097/PEP.0b013e3181beb09d
- López-alonso, V., Cheeran, B. et Fernández-del-olmo, M. (2015). Brain Stimulation Relationship Between Non-invasive Brain Stimulation-induced Plasticity and Capacity for Motor Learning, 8.
- Martini, R. et Wilson, B. N. (2012). French Canadian cross-cultural adaptation of the Developmental Coordination Disorder Questionnaire '07: DCDQ-FC. *Canadian Journal of Occupational Therapy*. doi:10.2182/cjot.2011.78.5.7
- Mattai, A., Miller, R., Weisinger, B., Greenstein, D., Bakalar, J., Tossell, J., ... Rapoport, J. (2011). Tolerability of transcranial direct current stimulation in childhood-onset schizophrenia. *Brain Stimulation*, 4(4), 275-280. doi:10.1016/j.brs.2011.01.001
- Maxwell, J. P., Masters, R. S. . et Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(4), 1049-1068.
- McMEEKAN, E. R. L. et Lishman, W. a. (1975). Retest reliabilities and interrelationship of the Annett Hand Preference Questionnaire and the Edinburgh Handedness Inventory. *British Journal of Psychology*, 66(1), 53-59. doi:10.1111/j.2044-8295.1975.tb01439.x
- Moliadze, V., Andreas, S., Lyzhko, E., Schmanke, T., Gurashvili, T., Freitag, C. M. et Siniatchkin, M. (2015). Ten minutes of 1mA transcranial direct current stimulation was well tolerated by children and adolescents: Self-reports and resting state EEG analysis. *Brain Research Bulletin*, 119, 25-33. doi:10.1016/j.brainresbull.2015.09.011
- Nadeau, A., Lungu, O. et Duchesne, C. (2017). A 12-Week Cycling Training Regimen Improves Gait and Executive Functions Concomitantly in People with Parkinson ' s Disease, 10(January), 1-10. doi:10.3389/fnhum.2016.00690
- Ngomo, S., Leonard, G. et Mercier, C. (2012). Influence of the amount of use on hand motor cortex representation: Effects of immobilization and motor training. *Neuroscience*, 220, 208-214. doi:10.1016/j.neuroscience.2012.06.018
- Ngomo, S., Leonard, G., Moffet, H. et Mercier, C. (2012). Comparison of transcranial

- magnetic stimulation measures obtained at rest and under active conditions and their reliability. *Journal of Neuroscience Methods*, 205(1), 65-71.  
doi:10.1016/j.jneumeth.2011.12.012
- Nissen, M. J. et Bullemer, P. (1987). Attentional Requirements of Learning : Evidence from Performance Measures. *cognitive psychology*, 32.
- Nitsche, M. a et Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, 527 Pt 3, 633-9. doi:PHY\_1055 [pii]
- Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W. et Tergau, F. (2003a). Facilitation of Implicit Motor Learning by Weak Transcranial Direct Current Stimulation of the Primary Motor Cortex in the Human. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 619-626. doi:10.1162/089892903321662994
- Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W. et Tergau, F. (2003b). Facilitation of Implicit Motor Learning by Weak Transcranial Direct Current Stimulation of the Primary Motor Cortex in the Human. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 619-626.
- O’Dea et Connell, A. (2016). Performance difficulties , activity limitations and participation restrictions of adolescents with developmental coordination disorder ( DCD ). *British Journal of Occupational Therapy*, 79(9), 540-549.  
doi:10.1177/0308022616643100
- Oberman, L. M. et Enticott, P. G. (2015). Editorial: The safety and efficacy of noninvasive brain stimulation in development and neurodevelopmental disorders. *Frontiers in human neuroscience*, 9(October), 1543-1554.  
doi:10.1212/WNL.57.9.1543
- Oldfield, R. C. (1971). Oldfield1971.pdf. *Neuropsychologia*, 9, 97 - 113.
- Palm, U., Keeser, D., Schiller, C., Fintescu, Z., Reisinger, E., Padberg, F. et Nitsche, M. (2008). Skin lesions after treatment with transcranial direct current stimulation (tDCS). *Brain Stimulation*, 1(4), 386-387. doi:10.1016/j.brs.2008.04.003
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A. et Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of neurophysiology*, 74(3), 1037-45. Repéré à <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7500130>
- Peters, L. H. J., Maathuis, K. G. B., Kouw, E., Hamming, M. et Hadders-algra, M. (2008). Original article Test – retest , inter-assessor and intra-assessor reliability of the modified Touwen examination. *European Journal of Paediatric Neurology*, 12, 328-333. doi:10.1016/j.ejpn.2007.09.006
- Podda, M. V., Cocco, S., Mastrodonato, A., Fusco, S., Leone, L., Barbati, S. A., ... Grassi, C. (2016). Anodal transcranial direct current stimulation boosts synaptic plasticity and memory in mice via epigenetic regulation of Bdnf expression. *Nature Publishing Group*, 1-19. doi:10.1038/srep22180

- Pozzi, N. G., Minafra, B., Zangaglia, R., Marzi, R. De, Sandrini, G., Priori, A. et Pacchetti, C. (2014). Transcranial Direct Current Stimulation ( tDCS ) of the Cortical Motor Areas in Three Cases of Cerebellar Ataxia. *Cerebellum*, 13, 109-112. doi:10.1007/s12311-013-0524-5
- Pratt, M. L. et Hill, E. L. (2011). Research in Developmental Disabilities Anxiety profiles in children with and without developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(4), 1253-1259. doi:10.1016/j.ridd.2011.02.006
- Purtsi, J., Vihko, V., Kankaanpää, A. et Havas, E. (2012). The Motor-Learning Process of Older Adults in Eccentric Bicycle Ergometer Training. *Journal Aging and Physical Activity*, 20, 345-362.
- Querne, L., Berquin, P., Vernier-Hauvette, M. P., Fall, S., Deltour, L., Meyer, M. E. et de Marco, G. (2008). Dysfunction of the attentional brain network in children with Developmental Coordination Disorder: A fMRI study. *Brain Research*, 1244, 89-102. doi:10.1016/j.brainres.2008.07.066
- Ramnani, N., Toni, I., Passingham, R. E. et Haggard, P. (2001). The Cerebellum and Parietal Cortex Play a Specific Role in Coordination : A Pet Study. *NeuroImage*, 911, 899-911. doi:10.1006/nimg.2001.0885
- Rasmussen, P. et Gillberg, C. (2000). Natural Outcome of ADHD With Developmental Coordination Disorder at Age 22 Years : A Controlled , Longitudinal , Community-Based Study. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 39(11), 1424-1431. doi:10.1097/00004583-200011000-00017
- Reis, J., Fischer, J. T., Prichard, G., Weiller, C., Cohen, L. G. et Fritsch, B. (2015). Time- but Not Sleep-Dependent Consolidation of tDCS-Enhanced Visuomotor Skills, (January), 109-117. doi:10.1093/cercor/bht208
- Reis, J. et Fritsch, B. (2011). Modulation of motor performance and motor learning by transcranial direct current stimulation. *Current Opinion in Neurology*, 24, 1350-7540. doi:10.1097/WCO.0b013e32834c3db0
- Reis, J., Schambra, H. M., Cohen, L. G., Buch, E. R., Fritsch, B., Zarahn, E., ... Krakauer, J. W. (2009). Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(5), 1590-1595. doi:10.1073/pnas.0805413106
- Robertson, E. M. (2007). The Serial Reaction Time Task: Implicit Motor Skill Learning? *J. Neurosci.*, 27(38), 10073-10075. doi:10.1523/JNEUROSCI.2747-07.2007
- Saucedo Marquez, C. M., Zhang, X., Swinnen, S. P., Meesen, R. et Wenderoth, N. (2013). Task-specific effect of transcranial direct current stimulation on motor learning. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 333. doi:10.3389/fnhum.2013.00333
- Savic, B. et Meier, B. (2016). How Transcranial Direct Current Stimulation Can

- Modulate Implicit Motor Sequence Learning and Consolidation : A Brief Review. *Frontiers in human neuroscience*, 10(February). doi:10.3389/fnhum.2016.00026
- Schambra, H. M., Abe, M., Luckenbaugh, D. A., Reis, J., Krakauer, J. W. et Cohen, L. G. (2011). Probing for hemispheric specialization for motor skill learning : a transcranial direct current stimulation study. *Journal of neurophysiology*, 652-661. doi:10.1152/jn.00210.2011.
- Schlerf, J. E., Galea, J. M., Bastian, A. J. et Celnik, P. A. (2012). Dynamic Modulation of Cerebellar Excitability for Abrupt , But Not Gradual , Visuomotor Adaptation. *The Journal of Neuroscience*, 32(34), 11610-11617. doi:10.1523/JNEUROSCI.1609-12.2012
- Schoemaker, M. M. et Smits-engelsman, B. C. M. (2015). Is Treating Motor Problems in DCD Just a Matter of Practice and More Practice ? *Current Developmental Disorders Reports*, 2, 150-156. doi:10.1007/s40474-015-0045-7
- Shelley A. Goodgold-Edwards, S. A. C. (1990). Integrating Motor Control and Motor Learning Concepts With Neuropsychological Perspectives on Apraxia and Developmental Dyspraxia. *American Journal of Occupational Therapy*, 44, 431-439.
- Shimizu, R. E., Wu, A. D., Samra, J. K., Knowlton, B. J. et Knowlton, B. J. (2017). The impact of cerebellar transcranial direct current stimulation ( tDCS ) on learning fine-motor sequences. *Philosophical Transactions*, 372, 1-10.
- Shmuelof, L., Krakauer, J. W. et Mazzoni, P. (2012). How is a motor skill learned ? Change and invariance at the levels of task success and trajectory control. *Journal Neurophysiology*, 108, 578-594. doi:10.1152/jn.00856.2011
- Smits-Engelsman, B. C. M., Blank, R., Van Der Kaay, A.-C., Mosterd-Van Der Meijjs, R., Vlugt-Van Den Brand, E., Polatajko, H. J. et Wilson, P. H. (2013). Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder: a combined systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 229–237. doi:10.1111/dmcn.12008
- Smits-Engelsman, B. C. M., Wilson, P. H., Westenberg, Y. et Duysens, J. (2003). Fine motor deficiencies in children with developmental coordination disorder and learning disabilities : An underlying open-loop control deficit. *Human kinetics Publishers*, 22, 495-513. doi:10.1016/j.humov.2003.09.006
- Soltaninejad, Z., Nejati, V. et Ekhtiari, H. (2015). Effect of Anodal and Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation on DLPFC on Modulation of Inhibitory Control in ADHD. doi:10.1177/1087054715618792
- Stagg, C. J., Jayaram, G., Pastor, D., Kincses, Z. T., Matthews, P. M. et Johansen-berg, H. (2011). Neuropsychologia Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning. *Neuropsychologia*, 49(5), 800-804. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.009
- Stagg, C. J. et Nitsche, M. A. (2014). Neuroscientist Physiological Basis of Transcranial

- Direct Current Stimulation. doi:10.1177/1073858410386614
- Swaine, B. R., Lortie, É. et Gravel, D. (2005). The reliability of the time to execute various forms of the Finger-to-Nose Test in healthy subjects. *Physiotherapy Theory and Practice*, 21(4), 271-279. doi:10.1080/09593980500321119
- Thibaut, A., Chatelle, C., Gosseries, O., Laureys, S. et Bruno, M. A. (2013). La stimulation transcrânienne à courant continu : un nouvel outil de neurostimulation. *Revue Neurologique*, 169(2), 108-120. doi:10.1016/j.neurol.2012.05.008
- Tseng, Y., Krakauer, J. W., Shadmehr, R. et Bastian, A. J. (2007). Sensory Prediction Errors Drive Cerebellum-Dependent Adaptation of Reaching. *Journal of neurophysiology*, 98, 54-62. doi:10.1152/jn.00266.2007.
- Vaivre-Douret. (2007). Troubles d'apprentissage non verbal : les dyspraxies développementales Non-verbal learning disabilities : developmental dyspraxia. *Archives de pédiatrie*, 14, 1341-1349. doi:10.1016/j.arcped.2007.06.034
- Walker, M. P., Brakefield, T. et Hobson, J. A. (2003). Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature Publishing Group*, 425, 8-12. doi:10.1038/nature01951.1.
- Williams, S. M. (1991). Handedness inventories: Edinburgh versus Annett. *Neuropsychology*, 5(1), 43-48. doi:10.1037/0894-4105.5.1.43
- Wilson, B., Pollock, N., Bonnie, J., Law, M. et Faris, P. (1992). Reliability and Construct Validity of the Clinical and Postural Skills. *The American journal of occupational therapy*, 46, 775-783.
- Wilson, P. H., Maruff, P. et Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder, 22, 515-526. doi:10.1016/j.humov.2003.09.007
- Wuang, Y. P., Su, J. H. et Su, C. Y. (2012). Reliability and responsiveness of the Movement Assessment Battery for Children-Second Edition Test in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 54(2), 160-165. doi:10.1111/j.1469-8749.2011.04177.x
- Wulf, G., Shea, C. et Lewthwaite, R. (2010). motor skill learning Motor skill learning and performance : a review of influential factors. *Medical Education*, 44, 75-84. doi:10.1111/j.1365-2923.2009.03421.x
- Young, S. J., Bertuccio, M. et Sanger, T. D. (2014). Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation in Children With Dystonia : A Sham-Controlled Study, 29(2), 232-239. doi:10.1177/0883073813492385
- Zimmerman, M., Heise, K. F., Hoppe, J., Cohen, L. G., Gerloff, C., Hummel, F. C., ... Disorders, N. (2012). HHS Public Access. *Stroke*, 43(8), 2185-2191. doi:10.1161/STROKEAHA.111.645382.Modulation
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. (2010). Brain Activation of Children With Developmental Coordination Disorder Is Different Than Peers.

- Pediatrics*, 126(3), e678-e686. doi:10.1542/peds.2010-0059
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. A. (2011). Brain activation associated with motor skill practice in children with developmental coordination disorder: An fMRI study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 29(2), 145-152. doi:10.1016/j.ijdevneu.2010.12.002
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R. et Boyd, L. A. (2012). Developmental coordination disorder: A review and update. *European Journal of Paediatric Neurology*, 16(6), 573-581. doi:10.1016/j.ejpn.2012.05.005

## Annexes

### Annexe i : Tableau des patrons d'activité cérébrale chez l'enfant TAC

Les auteurs de l'étude	Diminution de l'activité	Augmentation de l'activité
Debrabant et <i>al.</i> 2013 (N=17)	La région dorsolatérale du cortex préfrontal (DLPFC), dans la région cérébelleuse postérieure gauche et dans la jonction temporo-pariétale droite et le gyrus frontal inférieur droit	
Querne et <i>al.</i> 2008 (N=19)	La partie postérieure du réseau attentionnel, en particulier dans l'hémisphère droit, entre le striatum et le cortex pariétal inférieur	La partie antérieure du réseau entre le cortex cingulaire antérieur et frontal moyen et le cortex pariétal inférieur dans l'hémisphère gauche
Kashiwagi et <i>al.</i> 2009 (N=24)	Le cortex pariétal supérieur et inférieur gauche et le gyrus postcentral	
McLeod et <i>al.</i> 2014 (N=79 dont 7 enfants ayant un TAC)	Entre le cortex moteur primaire et le gyrus frontal inférieur bilatéral, gyrus supramarginal droit, gyrus angulaire, insular cortice, amygdala, putamen, Pallidum	
Zwicker et <i>al.</i> 2011 (N=14)	La région dorsolatérale du cortex préfrontal (DLPFC),  Réseaux neuronaux entre les régions cérébelleuses et les cortex pariétal inférieur et préfrontal, et dans des régions impliquées dans l'apprentissage visuo-spatial  Le lobe pariétal inférieur gauche	

	Le cervelet	
Wilson et <i>al.</i> , 2012	Le cortex sensorimotor primaire Le gyrus postéro-supérieur temporal gyrus, cervelet, l'aire motrice supplémentaire, le lobe pariétal gauche	
Zwicker et <i>al.</i> , 2010 (N=14)	Le précuneus gauche, gyrus frontal supérieur gauche, insula/gyrus temporale supérieure droite, gyrus frontal inférieur gauche, gyrus postcentral gauche	Le lobule pariétal inférieur gauche, gyrus frontal moyen, gyrus frontal supérieur gauche, gyrus frontal inférieur gauche, gyrus supramarginal droit, gyrus lingual droit, gyrus  parahippocampal droit, gyrus cingulaire postérieur droit, gyrus précentral droit, gyrus temporal supérieur droit, et le lobule cérébelleux VI droite, precuneus gauche

## Annexe v : Affiche

### Étude sur l'amélioration de l'apprentissage et la coordination motrice chez les enfants dyspraxiques/ ayant trouble d'acquisition de la coordination (TAC)



**Qui ?** Enfants et adolescents âgés de 10 à 17 ans, ayant un diagnostic de dyspraxie ou de trouble d'acquisition de la coordination

**Quoi ?** Objectif de l'étude est d'évaluer l'amélioration de l'apprentissage et la coordination motrice en utilisant la stimulation à courant direct (SCD)

**Où?** Au sein du centre de recherche de CHUS (CRCHUS)

**Durée ?** 4 séances d'environ 1h, sur un période de 2 semaines

Le projet est approuvé par le comité d'éthique du CHUS

Vous recevrez une compensation de 10\$/évaluation pour couvrir les frais de déplacements

## Annexe vi : Lettre de non-objection de contact



**Objet : Évaluation de l'effet de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant un trouble de l'acquisition de la coordination**

---

Bonjour,

Nous vous contactons aujourd'hui parce que nos dossiers indiquent que votre enfant a été en contact avec le CHUS pour des services qui pourraient être en lien avec un trouble de l'acquisition de la coordination (TAC, parfois appelé dyspraxie).

Nous collaborons avec des chercheurs qui effectuent un projet de recherche qui vise à améliorer l'apprentissage moteur et la coordination motrice des enfants ayant un TAC en utilisant la stimulation à courant direct (SCD). Votre enfant pourrait être éligible à ce projet de recherche, si celui-ci a un diagnostic officiel de TAC ou de dyspraxie. Le projet implique quatre visites d'environ une heure au centre de recherche du CHUS.

Pour plus d'information sur la stimulation et les instruments utilisés, veuillez consulter la vidéo sur ce lien : <https://www.youtube.com/watch?v=fto72DXnmV0>

**Si vous ne voulez pas** que l'assistante de recherche de ce projet vous appelle pour vous parler du projet, S.V.P. appelez aux 819-346-8411 postes 14380 avant le 09 Décembre 2016 en mentionnant le nom de votre enfant, sa date de naissance et le titre de l'étude en disant que vous ne voulez pas être contacté.

Si nous n'avons pas reçu de message de votre part avant la date indiquée ci dessus, nous considérons que vous acceptez que l'équipe de recherche vous contacte pour vous proposer de participer à ce projet de recherche. Sachez que cette étude n'interfère pas avec les soins que vous recevez, que cet appel téléphonique ne vous engage à rien et soyez assuré(e) que peu importe votre réponse, ceci n'aura aucun impact sur votre suivi médical.

Cette étude a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche en santé chez l'humain du CR CHUS. Les chercheurs de l'étude sont Chantal Camden, Hélène Corriveau, Jean-François Lepage et Haifa Akremi.]

## Annexe vii : Formulaire de consentement



1		
2	<b>FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT À LA RECHERCHE DU</b>	
3		<b>PARTICIPANT</b>
4		
5	<b>Titre du projet:</b>	Évaluation de l'effet de la stimulation à courant
6		direct sur l'apprentissage moteur des enfants
7		ayant un trouble d'acquisition de la coordination
8		
9	<b>Titre abrégé du projet:</b>	TAC-SCD
10		
11	<b>No de dossier au CER du CHUS:</b>	2017-1451
12		
13	<b>Chercheurs principaux:</b>	Pre. Chantal Camden, pht, Ph.D,
14		Professeure adjointe, Faculté de médecine et des
15		sciences de la santé, Université de Sherbrooke,
16		Centre de recherche du CHUS
17		Pre. Hélène Corriveau, pht, Ph.D.
18		Professeure, Université de Sherbrooke, Centre de
19		recherche sur le vieillissement, Réadaptation
20		
21		Pr. Jean-François Lepage, Ph.D.
22		Professeur titulaire. Département de pédiatrie,
23		service de neuropédiatrie, Faculté de médecine et
24		des sciences de la santé, Université de
25		Sherbrooke
26		
27	<b>Chercheur-étudiant :</b>	Haifa Akremi, pht.
28		Étudiante en maîtrise en sciences de la santé,
29		Faculté de médecine et des sciences de la santé,
30		Université de Sherbrooke

### PRÉAMBULE

Nous sollicitons la participation de votre enfant à un projet de recherche parce qu'il présente un trouble d'acquisition de la coordination (TAC) et éprouve des difficultés d'apprentissage et de coordination motrice. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent. Si vous acceptez que votre enfant participe au projet de recherche, vous devrez signer le formulaire de consentement à la fin du présent document et nous vous en remettrons une copie pour vos dossiers.

45 Ce formulaire d'information et de consentement vous explique le but de ce projet de  
 46 recherche, les procédures, les risques et inconvénients ainsi que les avantages, de  
 47 même que les personnes avec qui communiquer au besoin. Il peut contenir des mots  
 48 que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions  
 49 nécessaires au chercheur responsable du projet ou aux autres personnes affectées au  
 50 projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement  
 51 qui n'est pas clair.

52

### 53 **NATURE ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE**

54 Le présent projet vise à évaluer l'effet de la stimulation à courant direct (SCD) pour  
 55 faciliter l'apprentissage et la coordination motrice d'un enfant avec un TAC dans une  
 56 activité fonctionnelle. Plus précisément, nous voulons savoir s'il est possible d'améliorer  
 57 l'apprentissage et la coordination motrice en agissant sur les origines neurologiques de  
 58 ces troubles à l'aide d'une technique de stimulation transcrânienne, la SCD. Ce projet  
 59 permettra d'évaluer l'amélioration de l'apprentissage et la coordination motrice à la suite  
 60 de l'application de la SCD pour éventuellement y définir une pertinence clinique. Par la  
 61 suite, la SCD pourrait devenir un outil pour bonifier l'efficacité des interventions visant  
 62 l'apprentissage moteur dans le traitement de TAC.

63 \* **La stimulation à courant direct** : La SCD a des effets neuromodulateurs sur l'activité  
 64 neuronale, c'est-à-dire qu'elle peut la diminuer ou augmenter. L'augmentation de  
 65 l'activité neuronale pourrait engendrer des effets bénéfiques sur la fonction motrice,  
 66 spécifiquement sur l'apprentissage moteur et la coordination motrice. On utilise un  
 67 courant de très faible intensité dont l'utilisation est attestée par Santé Canada.

68 Plus spécifiquement, nous souhaitons :1) évaluer les changements sur l'apprentissage  
 69 moteur; 2) évaluer les changements au niveau de la coordination motrice du bras; 3)  
 70 documenter la faisabilité d'appliquer la SCD auprès des enfants ayant un TAC.

71 Votre enfant sera assigné au hasard (comme à pile ou face) à l'un des groupes suivants  
 72 :

- 73 ➤ Groupe 1 (expérimental) : SCD avec stimulation active
- 74 ➤ Groupe 2 (témoin): SCD avec stimulation placebo (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de  
 75 courant actif)

76 Nous prévoyons recruter 24 participants au total, soit 12 par groupe.

77

### 78 **DÉROULEMENT DU PROJET DE RECHERCHE**

79 La participation de votre enfant à ce projet de recherche durera environ 2 semaines, et  
 80 ce, à partir de la signature du présent formulaire de consentement. La participation au  
 81 projet inclut un total de 4 séances d'intervention/évaluation. Les 3 premières séances  
 82 incluent l'intervention par SCD (active ou placebo), tandis que la 4<sup>e</sup> séance comprendra  
 83 uniquement la prise de mesure.

84 Voici comment le projet se déroulera :

- 85 1) Les trois premières séances, chacune espacées par 2 jours, auront lieu au  
 86 Centre de recherche du CHUS (CRCHUS) et dureront environ 1h, sauf pour la  
 87 1<sup>ère</sup> séance qui sera d'une durée de 2h. Elles comprendront chacune l'application  
 88 de la SCD (active ou placebo) et la prise de mesure pour évaluer :

- 89
- 90
- 91
- 92
- 93
- 94
- 95
- 96
- **Niveau de difficulté motrice : Impact des troubles de coordination sur la vie de l'enfant** : Questionnaire sur le trouble d'acquisition de la coordination (Q-TAC),
  - **Apprentissage moteur sur le plan clinique** : Tâche de pianotage
  - **Apprentissage moteur sur le plan neurophysiologique** : Potentiel évoqué moteur (PÉM). Les PÉM nous renseigne sur le fonctionnement de la voie motrice stimulée
  - **Coordination motrice du membre supérieur**: Test doigt-nez
- 97 \* À noter qu'à la 1<sup>ère</sup> séance uniquement, le formulaire de consentement sera expliqué
- 98 et signé et qu'un questionnaire socio-démographique sera administré en plus des
- 99 autres procédures.
- 100 *Stimulation à courant direct (SCD)* : Votre enfant sera confortablement assis sur une
- 101 chaise et l'expérimentateur positionnera deux éponges d'eau saline sur sa tête. Ces
- 102 éponges contiennent chacune une petite électrode qui induira une stimulation électrique
- 103 de très faible intensité. La stimulation peut provoquer une sensation de fourmillement,
- 104 mais cette dernière s'estompera au cours des premières secondes, de sorte qu'aucune
- 105 sensation ne sera présente au cours de l'expérimentation. La SCD active sera
- 106 appliquée pendant 20 minutes.
- 107
- 108 *Stimulation à courant direct (placebo)* : Avec les mêmes procédures, la stimulation
- 109 placebo présente un courant à très faible intensité seulement pour les 30 premières
- 110 secondes, pour donner au sujet l'impression de ressentir un courant. Puis, par la suite,
- 111 le courant s'annule pour le reste du temps. La SCD placebo sera appliquée pendant la
- 112 même durée que le courant du groupe d'intervention, soit 20 minutes.
- 113
- 114 2) 4<sup>e</sup> séance : La dernière séance, d'une durée approximative d'une heure aura
- 115 aussi lieu au CRCHUS. Elle comprendra les mêmes questionnaires/tests que les
- 116 séances précédentes, en plus d'un questionnaire sur la perception à l'égard de
- 117 l'intervention et sur les effets secondaires à l'application de la SCD.
- 118 **Vous trouverez à la dernière page, un tableau résumant le déroulement du projet**
- 119 **de recherche.**
- 120
- 121 **RISQUES ASSOCIÉS AU PROJET DE RECHERCHE**
- 122 La SCD est déjà très utilisée auprès des enfants et toutes les recherches montrent
- 123 qu'elle est sécuritaire et bien tolérée. Elle peut toutefois entraîner des inconforts
- 124 temporaires (qui disparaissent au bout de 2 heures maximum). Les principaux effets
- 125 secondaires documentés sont :
- Des picotements (11,5%) des démangeaisons (5,8%)
  - Une rougeur aux sites de stimulation (4,7%)
  - Une sensation d'inconfort au cuir chevelu (3,1%)
- 129 D'autres effets secondaires sont également rapportés occasionnellement (exemple :
- 130 douleur au cou, mal de tête, somnolence, difficulté de concentration, changement
- 131 d'humeur).
- 132

133 Dans la présente étude, toutes les précautions de sécurité recommandées seront  
 134 respectées par les chercheurs. Pour diminuer les risques d'effets indésirables cutanés,  
 135 nous utiliserons des éponges dans une solution d'eau saline faiblement concentrée  
 136 pour diminuer la sensation d'inconfort et nous augmenterons et diminuerons  
 137 graduellement l'intensité du courant, tel que recommandé dans les lignes directrices  
 138 d'utilisation de la SCD.

139 Durant cette étude, trois applications de la SCD seront effectuées avec un intervalle de  
 140 48h entre chaque application, ce qui nous permet de diminuer le risque d'effets  
 141 secondaires cutanés

#### 142 **INCONVÉNIENTS**

143 Le temps requis pour participer à l'étude, et les déplacements requis pour vous  
 144 présenter au CR CHUS, représentent également des inconvénients liés à votre  
 145 participation au projet. Il vous faudra réserver dans votre horaire, 4 séances d'une  
 146 heure (sauf la première de 2 heures) pour les évaluations.

147

#### 148 **AVANTAGES**

149 Il se peut que votre enfant retire un bénéfice personnel de sa participation à ce projet de  
 150 recherche, mais nous ne pouvons vous l'assurer.

151 Par ailleurs, les informations découlant de ce projet de recherche pourraient contribuer  
 152 à l'avancement des connaissances dans le domaine des interventions thérapeutiques  
 153 visant à améliorer l'apprentissage et la coordination motrice. La SCD pourrait devenir  
 154 un outil pour bonifier l'efficacité des interventions visant l'apprentissage moteur dans le  
 155 traitement de TAC.

156

#### 157 **PARTICIPATION VOLONTAIRE ET POSSIBILITÉ DE RETRAIT**

158 La participation de votre enfant à ce projet de recherche est volontaire. Vous et votre  
 159 enfant êtes donc libres de refuser d'y participer. Vous pouvez également demander qu'il  
 160 soit retiré de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en  
 161 faisant connaître votre décision au chercheur responsable du projet ou à l'un des  
 162 membres de l'équipe de recherche.

163 Votre décision de refuser que votre enfant participe à ce projet de recherche ou de l'en  
 164 retirer n'aura aucune conséquence sur la qualité des soins et des services auxquels  
 165 votre enfant a droit ou sur vos relations avec le chercheur responsable du projet et les  
 166 autres intervenants.

167 Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement de l'étude qui pourrait  
 168 affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai.

169 Si vous retirez votre enfant de l'étude ou s'il en est retiré, l'information médicale déjà  
 170 obtenue dans le cadre de l'étude sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour  
 171 assurer la sécurité des patients et rencontrer les exigences réglementaires.

172

#### 173 **ARRÊT DU PROJET DE RECHERCHE**

174 Le chercheur responsable de l'étude et le Comité d'éthique de la recherche en santé  
 175 chez l'humain du CHUS peuvent mettre fin à la participation de votre enfant, sans votre  
 176 consentement, pour les raisons suivantes :

- 177   ▪ Si de nouveaux développements scientifiques survenaient indiquant qu'il est de  
178    l'intérêt de votre enfant de cesser sa participation;  
179   ▪ Si le chercheur responsable du projet pense que cela est dans son meilleur intérêt;  
180   ▪ S'il ne respecte pas les consignes du projet de recherche;  
181   ▪ S'il existe des raisons administratives d'abandonner l'étude.

182

### 183 **CONFIDENTIALITÉ**

184 Durant la participation de votre enfant à ce projet, le chercheur responsable du projet  
185 ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les  
186 renseignements le concernant. Seuls les renseignements nécessaires pour répondre  
187 aux objectifs scientifiques de l'étude seront recueillis.

188 Ces renseignements peuvent comprendre les informations contenues dans son dossier  
189 médical concernant son état de santé passé et présent, ses habitudes de vie ainsi que  
190 les résultats de tous les tests, examens et procédures qu'il aura à subir durant ce projet.  
191 Son dossier peut aussi comprendre d'autres renseignements tels que son nom, date de  
192 naissance, sexe et origine ethnique.

193 Tous les renseignements recueillis au cours du projet demeureront strictement  
194 confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver l'identité de votre  
195 enfant et la confidentialité des renseignements, il ne sera identifié que par un numéro  
196 de code. La clé du code reliant le nom de votre enfant à son dossier de recherche sera  
197 conservée par le chercheur responsable du projet de manière sécuritaire.

198 Les données de recherche seront conservées pendant 5 ans par le chercheur  
199 responsable.

200 Les données pourront être publiées dans des revues spécialisées ou partagées avec  
201 d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Aucune publication ou  
202 communication scientifique ne renfermera quoi que ce soit qui puisse permettre de  
203 l'identifier.

204 À des fins de surveillance et de contrôle, le dossier de recherche de votre enfant ainsi  
205 que ses dossiers médicaux pourront être consultés par une personne mandatée par le  
206 Comité d'éthique de la recherche en santé chez l'humain du CHUS ou par  
207 l'établissement. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de  
208 confidentialité.

209 À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous  
210 rapidement, le nom et prénom de votre enfant, ses coordonnées et la date de début et  
211 de fin de sa participation au projet, seront conservés pendant un an après la fin du  
212 projet dans un répertoire sécurisé maintenu par le chercheur.

213 Vous avez le droit de consulter le dossier de recherche de votre enfant pour vérifier les  
214 renseignements recueillis et les faire rectifier au besoin, et ce, aussi longtemps que le  
215 chercheur responsable du projet ou l'établissement détiennent ces informations.  
216 Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique de l'étude, vous pourriez n'avoir  
217 accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée.

218

219

Évaluation de l'effet de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant des troubles d'acquisition de la coordination: Une étude pilote

---

220 **COMPENSATION**

221 Vous recevrez une compensation de 10\$ par séance (total de 40\$) pour couvrir les frais  
222 de déplacement et de stationnement.

223

224 **DROITS DU PARTICIPANT**

225 En acceptant que votre enfant participe à cette étude, vous ne renoncez pour lui à  
226 aucun de ses droits ni ne libérez les chercheurs ou l'établissement où se déroule ce  
227 projet de recherche de leurs responsabilités civile et professionnelle.

228

229 **IDENTIFICATION DES PERSONNES-RESSOURCES**

230 Si vous avez des questions concernant la participation de votre enfant au projet de  
231 recherche SVP vous référer à l'encadré de la page 1.

**Évaluation de l'effet de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant des troubles d'acquisition de la coordination: Une étude pilote**

---

246 **CONSENTEMENT**

247 Je déclare avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement,  
 248 particulièrement quant à la nature de la participation de mon enfant au projet de  
 249 recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le  
 250 projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour  
 251 prendre une décision.

252 Je consens librement et volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet.

253

254

255

256

Nom de l'enfant (lettres moulées)	Assentiment de l'enfant capable de comprendre la nature du projet (signature)	Date
--------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	------

257

*Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer mais capable de comprendre la nature de ce projet :	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------	------------------------------

258

259

260

261

Nom du titulaire de l'autorité parentale (lettres moulées)	Signature de l'autorité parentale	Date
------------------------------------------------------------------	--------------------------------------	------

262

263

264

265

Nom de la personne qui obtient le consentement (lettres moulées)	Signature de la personne qui obtient le consentement	Date
------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------	------

266

267

**Évaluation de l'effet de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant des troubles d'acquisition de la coordination: Une étude pilote**

---

268 **ENGAGEMENT DU CHERCHEUR**

269 Je certifie, avec mon équipe de recherche, que nous avons expliqué au titulaire de  
 270 l'autorité parentale du participant les termes du présent formulaire d'information et de  
 271 consentement, que nous avons répondu aux questions que le titulaire avait à cet égard  
 272 et que nous avons clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à la  
 273 participation de son enfant, et ce, sans préjudice.

274 Je m'engage, avec mon équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au  
 275 formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au  
 276 titulaire de l'autorité parentale du participant à la recherche.

277

278

279

280

---

Nom chercheur  
(lettres moulées)

---

Signature du chercheur

---

Date

281

282

**COPIE DU PARTICIPANT**

### CONSENTEMENT

Je déclare avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement, particulièrement quant à la nature de la participation de mon enfant au projet de recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens librement et volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet.

Nom de l'enfant (lettres moulées)	Assentiment de l'enfant capable de comprendre la nature du projet (signature)	Date
--------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	------

*Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer mais capable de comprendre la nature de ce projet :	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------	------------------------------

Nom du titulaire de l'autorité parentale (lettres moulées)	Signature de l'autorité parentale	Date
------------------------------------------------------------------	--------------------------------------	------

Nom de la personne qui obtient le consentement (lettres moulées)	Signature de la personne qui obtient le consentement	Date
------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------	------

### ENGAGEMENT DU CHERCHEUR

Je certifie, avec mon équipe de recherche, que nous avons expliqué au titulaire de l'autorité parentale du participant les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que nous avons répondu aux questions que le titulaire avait à cet égard et que nous avons clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à la participation de son enfant, et ce, sans préjudice.

Je m'engage, avec mon équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au titulaire de l'autorité parentale du participant à la recherche.

---

Nom chercheur  
(lettres moulées)

---

Signature du chercheur

---

Date

**COPIE DU CHERCHEUR**

## Annexe v : Approbation du comité éthique

CENTRE DE  
RECHERCHE



Sherbrooke, le 11 juillet 2016

Pre Chantal Camden

Objet : Approbation finale du projet de recherche par le  
Comité d'éthique de la recherche en santé chez l'humain du CHUS

Projet #2017-1451 - TAC-SCD

Évaluation de l'effet de l'application de la stimulation à courant direct sur l'apprentissage moteur des enfants ayant un trouble d'acquisition de coordination : projet pilote

Bonjour Pre Camden,

Le Comité d'éthique de la recherche en santé chez l'humain du CHUS a pris connaissance des documents réponses déposés dans Nagano à la suite de l'approbation conditionnelle du projet cité en rubrique.

Voici les documents réponses qui ont été reçus via le formulaire 20 # 8373 le 8 juillet 2016 et examinés en comité restreint le 11 juillet 2016 :

- 
- FC\_principal 07 juillet 2016.doc
- Affiche\_TAC\_V08-07-2016.docx

Il nous fait plaisir de vous informer que votre projet a été approuvé de façon finale au CÉR du CHUS le 11 juillet 2016, et ce, pour une période de 12 mois (11 juillet 2017).

Voici la liste des documents qui sont approuvés:

- Protocole de recherche, version 17 juin 2016
- Formulaire de consentement Mineurs, version 7 juillet 2016
- Dépliant-TAC\_V09-05-2016
- Affiche\_TAC\_V08-07-2016
- Questionnaire sociodémographique
- Questionnaire perception intervention
- Questionnaires effets secondaires de la TDCS 2
- Formulaire MABC-2\_ 7-10 ans

Vous devez attendre l'autorisation du directeur administratif de la recherche du Centre de recherche du CHUS avant de débiter la recherche. Certains aspects de la convenance organisationnelle doivent être évalués avant le début du recrutement des participants. Cette autorisation du Centre de recherche s'ajoute à l'approbation du Comité d'éthique.

En acceptant la présente lettre d'approbation finale du Comité d'éthique de la recherche en santé chez l'humain du CHUS, vous vous engagez à soumettre au Comité:

- toute demande de modification au projet de recherche ou à tout document approuvé par le comité pour la réalisation de votre projet.

- tout incidents thérapeutiques graves (SAE) / toutes réactions indésirables graves (SAR) qui sont envoyés au chercheur par le commanditaire sous différentes formes et appellations (IND Safety Letter, Safety Report, Alert Report, etc...) (réf.: CRC-RC5) dans les plus brefs délais.
- tout incidents thérapeutiques graves (SAE) / toutes réactions indésirables graves (SAR) survenant au CHUS dans les 24 heures suivant la prise de connaissance par l'équipe de recherche (réf.: CRC-RC6)
- Tout nouveau renseignement sur des éléments susceptibles d'affecter l'intégrité ou l'éthicité du projet de recherche ou d'accroître les risques et les inconvénients des sujets, de nuire au bon déroulement du projet ou d'avoir une incidence sur le désir d'un sujet de recherche de continuer sa participation au projet de recherche;
- Toute modification constatée au chapitre de l'équilibre clinique à la lumière des données recueillies;
- La cessation prématurée du projet de recherche, qu'elle soit temporaire ou permanente;
- Tout problème identifié par un tiers, lors d'une enquête, d'une surveillance ou d'une vérification interne ou externe;
- Toute suspension ou annulation de l'approbation octroyée par un organisme de subvention ou de réglementation;
- Toute procédure en cours de traitement d'une plainte ou d'une allégation de manquement à l'intégrité ou à l'éthique ainsi que des résultats de la procédure.

La présente décision peut être suspendue ou révoquée en cas de non-respect de ces exigences. En plus du suivi administratif d'usage, le CÉR pourra effectuer un suivi actif au besoin selon les modalités qu'il juge appropriées.

En terminant, nous vous rappelons que vous devez conserver pour une période d'au moins un an suivant la fin du projet, un répertoire distinct comprenant les noms, prénoms, coordonnées, date du début et de fin de la participation de chaque sujet de recherche.

Il est à noter qu'aucun membre du comité d'éthique participant à l'évaluation et à l'approbation de ce projet n'est impliqué dans celui-ci.

En ce qui concerne l'essai clinique visé, à titre de représentant du Comité d'éthique de la recherche, je certifie que: 1. La composition de ce Comité d'éthique satisfait aux exigences pertinentes prévues dans le titre 5 de la partie C du Règlement sur les aliments et drogues.

2. Le Comité d'éthique de la recherche exerce ses activités de manière conforme aux bonnes pratiques cliniques, et
3. Ce Comité d'éthique a examiné et approuvé le formulaire de consentement et le protocole d'essai clinique qui sera mené par le chercheur susmentionné, au lieu d'essai indiqué. L'approbation et les opinions du présent comité ont été consignées par écrit.
4. Ce Comité est conforme aux normes américaines. (FWA #00005894)

Je vous prie d'accepter, Pre Camden, mes meilleures salutations.