

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

L'IMPACT DES DISTRACTEURS ÉMOTIONNELS SUR LA MÉMOIRE DE
TRAVAIL : ÉTUDE PAR ÉLECTROENCÉPHALOGRAPHIE ET STIMULATION
TRANSCRÂNIENNE À COURANT DIRECT

ESSAI DE 3E CYCLE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT CONTINUUM D'ÉTUDES EN PSYCHOLOGIE
(PROFIL INTERVENTION)

PAR
LAURENCE DESBOIS

AVRIL 2022

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
DOCTORAT CONTINUUM D'ÉTUDES EN PSYCHOLOGIE
(PROFIL INTERVENTION) (D.Ps.)

Direction de recherche :

Frédéric Langlois Université du Québec à Trois-Rivières	directeur de recherche
--	------------------------

Isabelle Blanchette Université Laval	co-directrice de recherche
---	----------------------------

Jury d'évaluation :

Isabelle Blanchette Université Laval	co-directrice de recherche
---	----------------------------

Benjamin Boller Université du Québec à Trois-Rivières	évaluateur interne
--	--------------------

Isabelle Rouleau Université du Québec à Montréal	évaluatrice externe
---	---------------------

Sommaire

La présente étude examine l'impact des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail et comment la neurostimulation de la région préfrontale dorsolatérale du cerveau (DLPFC) par la stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS) peut moduler cet effet. Nous désirons aussi examiner s'il peut y avoir un lien entre le niveau d'anxiété d'un individu et nos variables, c'est-à-dire l'effet de la tDCS, la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels. Peu d'études ont combiné la neurostimulation et l'électroencéphalogramme (EEG) afin d'étudier expérimentalement l'effet de la neurostimulation sur les processus neuronaux associés aux interactions entre les émotions et la cognition. Cet essai présente d'abord un état des connaissances actuelles concernant les variables à l'étude. En premier lieu, nous détaillerons ce que sont la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels, comment ces processus cognitifs peuvent s'inter-influencer et comment il est possible de moduler leur effet avec des techniques de neurostimulation telles que la tDCS. Dans un deuxième temps, nous présentons pourquoi nous pensons que l'anxiété pourrait avoir un lien avec les variables à l'étude. Notre hypothèse principale stipule que la mémoire de travail est diminuée par un distracteur émotionnel de valence négative et que la stimulation anodale du DLPFC par la tDCS diminue l'effet délétère du distracteur sur la mémoire de travail. Nous posons également l'hypothèse que plus le niveau d'anxiété est élevé, plus l'impact négatif du distracteur sur la mémoire de travail est important. Pour réaliser notre étude,

un devis expérimental intra-sujet à condition placebo a été utilisé. L'échantillon se composait de 18 participants (5 hommes et 13 femmes), âgés de 21 à 31 ans. Pour mesurer la mémoire de travail des participants, une tâche de *n*-back modifiée était administrée, dans laquelle les participants devaient rappeler la couleur de stimuli vus *n* essais auparavant, dans une séquence de stimuli. La mémoire de travail était également mesurée au niveau de la composante de potentiel évoqué P300, en utilisant un électroencéphalogramme (EEG). Durant cette tâche de mémoire de travail, des distracteurs émotionnels auditifs étaient présentés. Les distracteurs étaient en pseudo-langage et comprenaient trois prosodies différentes: colérique, apeurée et neutre. Le traitement des distracteurs émotionnels était mesuré grâce à la composante de potentiel évoqué P200. Durant la tâche, une stimulation anodale par la tDCS était administrée au niveau du DLPFC. Au total, les participants effectuaient 120 essais au niveau de référence et 360 essais durant la stimulation. Les résultats de notre étude démontrent que l'efficacité de la mémoire de travail est effectivement affectée par les distracteurs émotionnels, tel qu'indiqué par une variation de l'amplitude des composantes de potentiel évoqué P300 ainsi que des temps de réponse à la tâche de *n*-back. Cependant, contrairement à notre hypothèse, la tDCS n'a pas eu d'effet sur la P300, la P200, l'exactitude ou les temps de réponse à la tâche de *n*-back. Finalement, une corrélation marginale, mais non significative, a été trouvée entre le niveau d'anxiété et la différence d'amplitude de la P200 associée au traitement des distracteurs à prosodie colérique vs neutre. En d'autres termes, plus les gens sont anxieux, plus leur cerveau réagit aux distracteurs colériques. Certains de nos résultats appuient les données de la littérature,

tels que : l'augmentation de la P200 par les distracteurs colériques, le lien négatif entre l'amplitude de la P300 et les temps de réponse au *n*-back et la corrélation entre l'anxiété et la P200 associée aux distracteurs colériques. De plus, notre étude remet en question l'efficacité de la tDCS ainsi que notre compréhension du lien entre la P200 et la P300. En bref, notre étude combinant l'EEG et la tDCS a permis d'approfondir les connaissances sur les mécanismes neuronaux liés à l'effet des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail, l'effet de la tDCS sur ces variables et le lien avec l'anxiété.

Table des matières

Sommaire	iii
Liste des figures	viii
Remerciements	ix
Introduction	10
Contexte théorique	15
Mémoire de travail	16
Distracteurs émotionnels	18
Effet bidirectionnel	19
Stimulation transcrânienne à courant direct	21
Effets sur les fonctions cognitives	22
Effet de l'anxiété sur les fonctions cognitives	25
Objectifs et hypothèses	27
Méthode	30
Approbation de l'éthique	31
Participants	31
Devis expérimental	32
Procédure et stimuli	32
Matériel	35
Environnement	35
Stimulation transcrânienne à courant direct	36
Électroencéphalogramme	36

Échelle d'anxiété de trait de Spielberg (STAI forme Y2)	37
Résultats	38
Potentiels évoqués.....	39
P200	40
P300	41
Comportemental.....	43
Temps de réponse	43
Exactitude	46
Discussion	47
Absence d'effet de la tDCS.....	48
Mémoire de travail.....	48
Traitement des distracteurs émotionnels.....	50
Effet des distracteurs émotionnels	51
Effet de la difficulté de la tâche	53
Mémoire de travail.....	53
Traitement des distracteurs émotionnels.....	53
Lien entre l'anxiété et la P200	54
Limites de notre étude.....	55
Conclusion	57
Références.....	60

Liste des figures

Figure

- 1 Amplitude de la P200 en fonction du distracteur émotionnel.....40
- 2 Amplitude de la P300 en fonction du distracteur émotionnel.....42
- 3 Amplitude de la P300 en fonction du distracteur émotionnel.....44
- 4 Temps de réponse en fonction de la difficulté de la tâche45

Remerciements

Je souhaite d'abord remercier ma directrice de recherche, Isabelle Blanchette, sans qui la réalisation de ce projet n'aurait pas été possible. Sa passion pour l'enseignement et la science, sa disponibilité ainsi que son encadrement tout au long de mon parcours doctoral ont été grandement appréciés. Le soutien apporté à chaque étape du projet ainsi que ses précieux commentaires m'ont permis de réaliser un essai dont je suis très fière. J'aimerais également remercier les membres de mon laboratoire de recherche pour leur esprit d'entraide. Finalement, j'aimerais remercier mon copain, Olivier, ainsi que mes parents qui ont toujours cru en moi et qui m'ont encouragée tout au long de mes études.

Introduction

Dans la vie quotidienne, nous effectuons fréquemment des activités qui demandent d'être attentif, de retenir des informations et de les manipuler mentalement. Ce type d'activité sollicite ce qu'on appelle la « mémoire de travail », qui représente la capacité à retenir des informations en mémoire sur le court terme et à manipuler ces informations pour effectuer des opérations mentales. Lire, résoudre un problème mathématique ou encore écouter une consigne pour ensuite l'exécuter sont tous des exemples de tâches qui recrutent la mémoire de travail. Il faut savoir que cette dernière a une capacité limitée. En effet, notre cerveau n'est en mesure de traiter qu'une petite quantité d'information à la fois. Lorsque trop de stimuli sont présents en même temps, le cerveau essaie de diriger ses ressources attentionnelles de manière efficace en privilégiant celles qui sont nécessaires pour atteindre le but qui avait été fixé.

De façon générale, nous arrivons à ignorer en partie les stimuli non pertinents à la tâche afin de se concentrer davantage sur ceux qui sont pertinents. Il est tout de même plus difficile d'être performant si toutes sortes de distracteurs surviennent durant la tâche. Certains types de distracteurs sont plus difficiles à ignorer que d'autres, tels que ceux à caractère émotionnel (Kensinger & Corkin, 2003; Vuilleumier, 2005). Par exemple, si nous entendons une voix en colère, quelle que soit la langue parlée ou le contenu du discours, notre cerveau aura tendance à y prêter une attention particulière. Selon la perspective évolutionniste, le cerveau est plus alerte à ce type de stimuli dans le

but d'assurer notre survie (Brosch et al., 2010). Ce phénomène est connu sous le terme de « biais attentionnel », qui représente la tendance à accorder son attention à certains stimuli plutôt qu'à d'autres. L'étude du biais attentionnel a amené une meilleure compréhension de certaines psychopathologies, par exemple le trouble anxieux. Effectivement, il a été montré que les personnes anxieuses ont un biais attentionnel envers les stimuli émotionnels plus important qu'une personne non anxieuse (Bar-Haim et al., 2007). Cela peut affecter leur fonctionnement au quotidien de façon importante. Le biais attentionnel a été largement étudié autant chez des populations saines que cliniques, mais les mécanismes neuronaux sous-jacents demeurent encore à ce jour peu connus. Les études de neurophysiologie commencent tout juste à émerger dans la littérature scientifique et sont essentielles pour mieux comprendre ce qui se produit au niveau neuronal lorsqu'une personne a un biais attentionnel. Il y aurait des bénéfices à avoir une meilleure compréhension des mécanismes neuronaux sous-jacents au biais attentionnel, notamment chez certaines populations dont le biais attentionnel est accentué tels que les troubles anxieux.

Dans les dernières années, des méthodes prometteuses visant à moduler les mécanismes neuronaux en jeu dans différents processus cognitifs ont été étudiées. Certaines études montrent qu'en agissant directement au niveau neuronal, on pourrait arriver à bonifier certaines habiletés (p. ex. la capacité à se concentrer sur la tâche) ou en inhiber d'autres (p. ex. l'attention particulière portée aux distracteurs émotionnels). La stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS), une méthode de neurostimulation,

émerge comme étant un outil prometteur pouvant moduler l'excitabilité corticale et pouvant ainsi affecter les processus cognitifs. La tDCS a donc le potentiel de pouvoir engendrer des effets positifs sur la performance dans plusieurs tâches cognitives en agissant directement au niveau neuronal.

Sachant que certains processus cognitifs sont connus comme étant altérés chez certaines populations cliniques, par exemple le biais attentionnel chez les individus anxieux, la tDCS pourrait potentiellement avoir des implications importantes pour les personnes souffrant de psychopathologies. Toutefois, avant d'être utilisée dans une perspective clinique, l'efficacité de la tDCS doit être démontrée. Les résultats sur l'efficacité de la tDCS de façon générale sont assez variables d'une étude à l'autre (Mancuso et al., 2016). L'utilisation de la neurostimulation dans une perspective clinique est donc encore marginale. Néanmoins, s'il est possible de démontrer que la tDCS peut moduler les processus cognitifs, elle pourrait éventuellement être utilisée dans le but de bonifier ou d'inhiber ces processus selon l'objectif visé.

Dans ce contexte, notre étude visera à mieux comprendre l'effet de la tDCS sur l'impact des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail ainsi que le lien avec l'anxiété. Pour ce faire, une revue de la littérature sera effectuée concernant la mémoire de travail, le traitement des distracteurs émotionnels et comment ces processus peuvent s'influencer mutuellement. Ensuite, nous verrons comment il est possible de moduler ces processus cognitifs par le biais de la tDCS. Finalement, nous verrons le lien entre

l'anxiété et le biais attentionnel. La méthodologie du projet sera ensuite présentée. Puis, les résultats seront exposés et discutés dans les sections subséquentes.

Contexte théorique

Dans les paragraphes subséquents, un état actuel des connaissances sera fait sur les variables à l'étude (mémoire de travail, traitement des distracteurs émotionnels, anxiété). Le mécanisme d'action et l'effet de la tDCS sur nos variables seront également expliqués. Finalement, l'objectif et les hypothèses de l'étude seront détaillés.

Mémoire de travail

La mémoire de travail joue un rôle important dans la vie quotidienne. Sa fonction est de maintenir de l'information en mémoire sur une courte période et de manipuler ces informations afin d'exécuter une opération complexe (APA, 2013). Ainsi, la mémoire de travail est nécessaire pour effectuer des activités cognitives de haut niveau telles que le raisonnement, la compréhension et les apprentissages (Baddeley, 2010). Le premier modèle de la mémoire de travail proposé par Baddeley et Hitch (1974) comprenait trois composantes : la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial ainsi que l'administrateur central. Selon ce modèle, l'information auditive peut être maintenue et répétée en mémoire par la boucle phonologique, alors que l'information visuelle peut l'être par le calepin visuo-spatial. L'administrateur central, quant à lui, permet de répartir les ressources attentionnelles entre les deux systèmes et de manipuler l'information. Plus tard, une quatrième composante fut ajoutée au modèle, soit le tampon épisodique, qui permet de représenter et d'intégrer l'information en provenance de chacune des composantes du modèle ainsi que de relier le modèle à la mémoire à long terme

(Baddeley, 2010). En bref, l'information peut être conservée en mémoire de travail sous forme visuelle, auditive ou les deux (Quark et al., 2015). La mémoire de travail peut se mesurer de diverses façons, tant au niveau comportemental (p. ex. performance à une tâche de mémoire de travail, tel que le *n*-back) que neurophysiologique (p. ex. mesure des potentiels évoqués). Un potentiel évoqué se définit comme la modification de l'activité électrique du système nerveux en réponse à une stimulation externe, telle qu'un stimulus visuel, ou interne, telle qu'une activité cognitive (Sur & Sinha, 2009). Dans la littérature, plusieurs auteurs ont utilisé la composante de potentiel évoqué P300 comme mesure électrophysiologique de la mémoire de travail durant une tâche de *n*-back (Bailey et al., 2016; Hill et al., 2019; SanMiguel et al., 2008). La tâche de *n*-back est une tâche qui a été créée pour entraîner une charge continue et modifiable sur la mémoire de travail; l'exactitude des réponses diminue et le temps de réponse augmente avec l'augmentation de la difficulté du *n*-back (Bailey et al., 2016). Dans cette tâche, une séquence de stimuli est présentée et les participants doivent, à chaque essai, rappeler le stimulus qui était présenté *n* essais auparavant. La P300, quant à elle, est une composante de potentiel évoqué qui survient généralement autour de 300ms après l'arrivée d'un stimulus. Son amplitude reflète les ressources attentionnelles disponibles pour réaliser la tâche. À mesure que la charge en mémoire de travail augmente, les ressources attentionnelles disponibles diminuent et l'amplitude de la P300 diminue également (Bailey et al., 2016; Polich, 2007; Watter et al., 2003). Cette relation entre les ressources attentionnelles disponibles et la mémoire de travail ont conduit les chercheurs à examiner l'effet des distractions sur la capacité à réaliser des tâches recrutant la

mémoire de travail. Entre autres, certains ont voulu investiguer l'impact que pouvait avoir les distracteurs émotionnels sur ce type de processus cognitif.

Distracteurs émotionnels

Au quotidien, nous avons naturellement tendance à ignorer les distractions présentes dans notre environnement dans le but de rester concentré sur l'action en cours. Les stimuli émotionnels, toutefois, sont un type particulier de distracteurs. Même lorsqu'ils ne sont pas pertinents pour la réalisation de la tâche en cours, ils ont tendance à être traités de façon préférentielle et automatique (Kensinger & Corkin, 2003; Vuilleumier, 2005). Ce phénomène est connu sous le nom de « biais attentionnel ». Le biais attentionnel pour ce type de stimuli résulte du fait que nos ressources attentionnelles, étant limitées, sont préférentiellement allouées pour les stimuli ayant une signification émotionnelle, en comparaison avec des stimuli neutres, puisqu'ils signalent des éléments potentiellement significatifs pour notre organisme.

Une façon d'objectiver le traitement des stimuli émotionnels est par les mesures électrophysiologiques. La composante de potentiel évoqué P200 a été utilisée par plusieurs chercheurs comme mesure neuronale du biais attentionnel pour les stimuli émotionnels visuels (Carretié et al., 2001; Han et al., 2014) et auditifs (Iredale et al., 2013; Paulmann et al., 2013; Schirmer et al., 2013). La P200 est une composante de potentiel évoqué associée aux processus attentionnels précoces et survenant autour de 200ms après le stimulus. La P200 est impliquée dans le biais attentionnel négatif, c'est-

à-dire que son amplitude est plus grande lorsque l'individu fait face à un stimulus émotionnel négatif plutôt qu'un stimulus émotionnel positif (Carretié et al., 2001). Les résultats d'études sur la prosodie vont dans le même sens; les prosodies émotionnelles, lorsque comparées avec une prosodie neutre, engendrent une plus grande amplitude de la P200 (Iredale et al., 2013; Schirmer et al., 2013). Bref, il est plutôt bien établi dans la littérature que l'augmentation de l'amplitude de la P200 est liée au traitement préférentiel des stimuli émotionnels visuels et auditifs.

Effet bidirectionnel

De plus en plus de chercheurs étudient l'impact de l'information émotionnelle sur la performance en mémoire de travail. Il a été constaté dans une récente méta-analyse que les distracteurs émotionnels négatifs ou déplaisants diminuent la performance dans une tâche de mémoire de travail (Schweizer et al., 2019). Quelques études ont tenté de comprendre les mécanismes neuronaux sous-jacents à ce phénomène en utilisant des mesures neurophysiologiques. Cette même méta-analyse a montré que les distracteurs émotionnels, présentés au cours d'une tâche de mémoire de travail, sont liés à moins d'activité dans les régions du cerveau impliquées dans la mémoire de travail (en particulier dans le cortex préfrontal dorsolatéral - DLPFC) en comparaison avec les distracteurs neutres. Le DLPFC est une région du cerveau impliquée dans la mémoire de travail et dans l'allocation des ressources attentionnelles vers les informations pertinentes pour la tâche (Peers et al., 2013). Le fait que les distracteurs émotionnels

diminuent l'activation du DLPFC soutient les résultats comportementaux mentionnés ci-dessus.

Au niveau des potentiels évoqués, une étude a montré que les distracteurs visuels menaçants augmentent la Contralateral Delay Activity (CDA), un index neurophysiologique du stockage en mémoire de travail visuelle. Ce résultat signifie que ces distracteurs sont emmagasinés dans la mémoire de travail visuelle même s'ils ne sont pas pertinents à la tâche. À l'inverse, les distracteurs visuels neutres n'augmentent pas la CDA, signifiant qu'ils sont efficacement filtrés hors de la mémoire de travail visuelle (Stout et al., 2013). Ainsi, les distracteurs menaçants nuisent aux processus de mémoire de travail, contrairement aux distracteurs neutres. Il a cependant été constaté que ces résultats peuvent être modulés par des différences individuelles de capacité en mémoire de travail. En effet, les personnes ayant une plus grande capacité de stockage en mémoire de travail visuelle sont meilleures à ignorer les distracteurs émotionnels, résultant en une meilleure performance, tandis que les personnes ayant une capacité de mémoire de travail visuelle plus limitée ont plus de difficulté à ignorer les distracteurs, en particulier ceux à connotation négative, résultant en une performance moindre (Ye et al., 2018). En bref, ces études démontrent que les distracteurs émotionnels diminuent la performance en mémoire de travail car ceux-ci sont stockés dans la mémoire de travail alors qu'ils ne sont pas pertinents pour la tâche en cours. Toutefois, la capacité individuelle de mémoire de travail peut moduler cet effet.

Selon la littérature, l'influence entre les stimuli émotionnels et la mémoire de travail serait bidirectionnelle. Comme il a été mentionné précédemment, les distracteurs émotionnels ont un effet sur les performances en mémoire de travail. Toutefois, il a également été constaté que l'activation des processus de mémoire de travail inhiberait le traitement des stimuli émotionnels. Selon plusieurs auteurs, l'augmentation de la difficulté de la tâche de mémoire de travail réduirait l'attention accordée aux stimuli émotionnels négatifs qui sont non pertinents à la tâche (Clarke & Johnstone, 2013; van Dillen & Derks, 2012). Ainsi, plus la mémoire de travail est sollicitée par la tâche, plus les distracteurs sont inhibés. Puisque la stimulation de certaines fonctions cognitives peut en inhiber d'autres, certains chercheurs ont décidé d'utiliser des techniques de neurostimulation afin d'investiguer davantage ces processus.

Stimulation transcrânienne à courant direct

La stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS) est une méthode de neurostimulation non invasive qui consiste à émettre un faible courant électrique (généralement de 1 à 2mA) via des électrodes placées sur la tête du participant à l'endroit désiré (Dedoncker et al., 2016; Thair et al., 2017). La tDCS comprend au moins deux électrodes de différentes polarités, soit l'anode et la cathode. L'anode possède une charge positive alors que la cathode possède une charge négative. L'objectif de la tDCS est de moduler l'excitabilité des neurones (Dedoncker et al., 2016). Les neurones sont des cellules nerveuses qui sont excitables électriquement, ce qui signifie qu'ils produisent des potentiels d'action lorsque le potentiel de leur membrane atteint un

certain seuil. Contrairement à d'autres méthodes de neurostimulation (p. ex. la stimulation magnétique transcrânienne), la tDCS n'induit pas directement le déclenchement des potentiels d'action. Elle engendre plutôt la modification du seuil d'excitabilité des neurones, ce qui altère leur activité spontanée (Stagg et al., 2018). Selon l'effet désiré, il est possible d'engendrer une stimulation anodale ou cathodale. Il a longtemps été supposé que la stimulation anodale pouvait augmenter l'excitation cérébrale et que la stimulation cathodale pouvait l'inhiber. Toutefois, une méta-analyse a montré que ces effets n'étaient retrouvés que dans les études visant les fonctions motrices et non dans les études ciblant les fonctions cognitives. Lorsque la tDCS est dirigée vers une région non motrice, l'anode cause effectivement une augmentation de l'excitation cérébrale, mais la cathode ne cause que rarement une inhibition (Jacobson et al., 2012).

Effets sur les fonctions cognitives

Des études ont suggéré que la tDCS pourrait engendrer des effets positifs sur la performance de plusieurs aspects de la cognition tels que la mémoire de travail, l'attention, les fonctions exécutives et le langage (Chrysikou et al., 2017; Coffman et al., 2014). En effet, la stimulation anodale de la tDCS pourrait augmenter la performance cognitive chez des populations saines et cliniques en augmentant l'excitation corticale (Coffman et al., 2014; Dedoncker et al., 2016; Pisoni et al., 2017). Des méta-analyses ont démontré que l'augmentation de l'activité du DLPFC par le biais de la tDCS peut améliorer les performances en mémoire de travail (Brunoni & Vanderhasselt, 2014; Hill

et al., 2016). Plus la demande cognitive est élevée, plus cet effet serait augmenté (Wu et al., 2014).

Une étude d'électroencéphalographie a suggéré que la tDCS n'a des effets bénéfiques sur la performance en mémoire de travail visuelle que chez les individus ayant une faible mémoire de travail visuelle, et non chez ceux ayant des capacités dans la moyenne ou supérieures (Hsu et al., 2014). En effet, l'analyse des signaux EEG des individus ayant une faible mémoire de travail montraient des ondes Alpha de plus haute amplitude (associé à un niveau inférieur d'attention) et la tDCS était en mesure de diminuer ce type d'onde et d'augmenter la performance en mémoire de travail de ces personnes. En revanche, chez les individus ayant déjà une mémoire de travail moyenne ou supérieure, les ondes Alpha étaient déjà de plus petite amplitude et la tDCS n'a pas eu d'effet sur celles-ci. En bref, l'inconsistance des résultats trouvés dans la littérature en ce qui a trait à l'efficacité de la tDCS pourrait entre autres être due à l'hétérogénéité des effets obtenus selon certaines différences individuelles.

Certains chercheurs ont utilisé la tDCS afin de déterminer si la neurostimulation peut diminuer le biais attentionnel envers les stimuli émotionnels. La littérature suggère que la stimulation électrique du DLPFC peut permettre de réduire les ressources attentionnelles allouées aux stimuli émotionnels (Ironsides et al., 2016; Sanchez-Lopez et al., 2018). Ces deux études ont utilisé une stimulation « offline », c'est-à-dire que la stimulation était administrée avant la tâche. L'une a mesuré le biais attentionnel à l'aide

d'une tâche « dot probe » durant laquelle des visages émotionnels et neutres étaient placés devant les cibles à détecter rapidement, alors que l'autre l'a mesuré en utilisant l'oculométrie (« eye tracking ») durant la présentation de visages émotionnels et neutres. Les résultats des deux études sont similaires; à la suite de la stimulation du DLPFC, les participants accordaient moins d'attention aux visages émotionnels, tels que mesuré par les temps de réponse à la tâche (Ironsides et al., 2016) et les temps de fixation (Sanchez-Lopez et al., 2018).

Plusieurs études se sont concentrées sur l'effet de la tDCS sur la mémoire de travail ou sur le biais attentionnel pour les stimuli émotionnels, mais peu d'entre elles ont investigué son impact sur l'ensemble de ces processus cognitifs lorsqu'ils se produisent simultanément. Une étude s'est penchée sur la question, mais les chercheurs se sont concentrés sur les distracteurs douloureux (Deldar et al., 2018). Ils ont constaté que, lors de la condition expérimentale (stimulation du DLPFC par la tDCS), l'effet des distracteurs douloureux était moins important lorsque la tâche de mémoire de travail était plus complexe (2-back) que lorsqu'elle était moins complexe (0-back). La conclusion de ces chercheurs est que l'augmentation de l'activité du DLPFC par la tDCS diminue l'effet des distracteurs en stimulant les processus de mémoire de travail. Il semble donc être possible d'utiliser la tDCS pour moduler le traitement des distracteurs douloureux au cours d'une tâche cognitive. Il reste encore toutefois à investiguer si le même phénomène se produit avec des distracteurs émotionnels. Il est essentiel de mieux comprendre les mécanismes de base en jeu dans le biais attentionnel pour les stimuli

émotionnels négatifs et l'influence que peut avoir la tDCS sur ceux-ci, car cela pourrait éventuellement avoir des répercussions pour les populations anxieuses, qui ont un biais attentionnel accru pour les stimuli émotionnels négatifs par rapport à une population saine (Dennis & Chen, 2007; Han et al., 2014; Mercado et al., 2006; Mercado et al., 2009; Pell et al., 2015).

Effet de l'anxiété sur les fonctions cognitives

Selon une perspective évolutionniste, afin de nous protéger contre les situations dangereuses, notre cerveau oriente son attention vers les stimuli pertinents pour sa survie (Brosch et al., 2010). Cette habileté est essentielle et adaptative dans une certaine mesure. Cependant, dans certains cas, ce biais attentionnel peut être inadapté. Cela est particulièrement vrai chez les personnes anxieuses (Bar-Haim et al., 2007; Eldar et al., 2010; Stout et al., 2013). Les individus anxieux se montrent davantage vigilants envers les stimuli émotionnels négatifs comparativement aux stimuli neutres, et ce, même sur le plan neuronal. Plus précisément, cette population a une P200 plus importante lorsqu'elle fait face à des stimuli émotionnels, ce qui représente un traitement attentionnel accru pour ce type de stimuli (Dennis & Chen, 2007; Han et al., 2014; Mercado et al., 2006; Mercado et al., 2009; Pell et al., 2015).

L'anxiété a également un impact sur la capacité de mémoire de travail. Une méta-analyse a révélé que le niveau d'anxiété auto-rapporté est associé avec de plus faibles performances dans ce type de tâche (Moran, 2016). Une étude d'IRMf permet d'offrir

une piste d'explication à ce phénomène. En effet, les résultats ont montré une relation négative entre le niveau d'anxiété et l'activation du DLPFC durant l'exécution d'une tâche cognitive. Cette sous-activation peut en partie expliquer la plus faible performance des participants anxieux (Bishop, 2009).

Il a été trouvé que lorsque des distracteurs menaçants surviennent durant une tâche de mémoire de travail, les individus anxieux performant moins bien que les individus non anxieux. (Stout et al., 2013). Les personnes anxieuses ne parviendraient pas à inhiber efficacement les distracteurs négatifs ; elles leur permettent d'accéder à la mémoire de travail, même s'ils ne sont pas pertinents à la tâche. En contrepartie, les individus non anxieux se montrent plus efficaces pour inhiber les stimuli menaçants non pertinents à tâche en ne les maintenant pas dans leur mémoire de travail (Stout et al., 2013).

En bref, l'anxiété est une variable individuelle ayant un impact sur le traitement des distracteurs émotionnels et sur la performance en mémoire de travail. En effet, les personnes anxieuses ont un système attentionnel plus sensible et plus orienté vers les stimuli émotionnels et présentent une moins grande activation du DLPFC lors de tâches cognitives, ce qui résulte en une moins bonne performance aux tâches de mémoire de travail comparativement aux individus sains, qu'il y ait présence de distracteurs ou non.

Ainsi, les connaissances actuelles sur le sujet montrent que les stimuli émotionnels peuvent effectivement nuire à la mémoire de travail. Il est également connu que les personnes ayant un niveau plus élevé d'anxiété ont un plus grand biais attentionnel pour les stimuli émotionnels négatifs et offrent de plus faibles performances dans les tâches de mémoire de travail. Ce qu'il reste à mieux comprendre, c'est le rôle que peut jouer la neurostimulation sur la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels. À l'heure actuelle, les données suggèrent que la stimulation anodale de la tDCS aurait le potentiel d'augmenter l'excitabilité cérébrale et, ainsi, améliorer certaines fonctions cognitives comme la mémoire de travail. Toutefois, peu d'études ont combiné l'EEG et la tDCS pour investiguer ces phénomènes au niveau neuronal. Mieux comprendre l'effet de la tDCS sur la mémoire de travail et sur le traitement des distracteurs émotionnels est important dans l'optique où la tDCS a le potentiel d'être utilisé pour traiter les troubles cognitifs associés à certaines psychopathologies (Fregni et al., 2021). Avant d'être utilisé dans une perspective clinique, des études doivent être menées sur des populations saines afin de mieux comprendre les mécanismes neuronaux et l'impact potentiel de la tDCS.

Objectifs et hypothèses

Le but de cette étude était d'examiner l'effet des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail et comment la stimulation anodale par la tDCS module cet effet. Nous avons également examiné le lien entre le niveau d'anxiété et ces variables. Nous avons donc étudié le rôle de la tDCS sur la mémoire de travail en stimulant le DLPFC

gauche, puisque les études montrent que c'est l'une des principales régions cérébrales impliquées dans la mémoire de travail et l'inhibition des distracteurs (Andrews et al., 2011; Dolcos & McCarthy, 2006; Dores et al. 2017; Rodriguez-Jimenez et al. 2009). La combinaison de la tDCS et de l'EEG nous a permis de recueillir des données sur le plan neurophysiologique en plus de nos données comportementales. Pour cette étude, nous avons conçu une expérimentation durant laquelle les participants ont effectué une tâche de mémoire de travail appelée « *n*-back ». Cette dernière permet d'évaluer la capacité de mémoire de travail et est très utilisée en recherche (Kearney-Ramos et al., 2014). Le *n*-back est réputé pour augmenter l'activation du DLPFC (Owen et al., 2005), qui est la région cérébrale que nous désirons stimuler. Notre tâche comprenait deux charges de mémoire de travail: un 1-back, dans lequel les participants devaient rappeler la couleur du stimulus vu un essai auparavant, et un 2-back, dans lequel les participants devaient rappeler la couleur du stimulus vu deux essais auparavant. Lors de cette tâche, des distracteurs émotionnels auditifs étaient présentés. Ces distracteurs étaient du pseudo-langage avec une prosodie colérique, apeurée ou neutre. Durant l'expérimentation, soit après le niveau de référence, les participants recevaient une stimulation anodale vis-à-vis du DLPFC. Un devis expérimental intra-sujet à condition placebo a été utilisé pour cette étude. L'impact des variables indépendantes (la condition expérimentale, le temps, le niveau de difficulté de la tâche et le type de distracteur) sur les variables dépendantes (P200, P300, exactitude et temps de réponse au *n*-back) a été examiné. Des corrélations ont également été menées entre l'anxiété et les variables dépendantes de l'étude.

Notre hypothèse principale est que la capacité de mémoire de travail (indexée par la P300, l'exactitude et les temps de réponse) est diminuée par les distracteurs émotionnels de valence négative et que la stimulation anodale du DLPFC par la tDCS devrait diminuer cet effet. Plus précisément, il est attendu que la présentation des distracteurs émotionnels augmente l'amplitude de la P200 associée à ces stimuli, atténue l'amplitude de la P300 associée aux stimuli reliés à la tâche de *n*-back et diminue la performance à cette tâche. Plus le niveau d'anxiété est élevé, plus la P200 associée aux distracteurs émotionnels devrait être élevée et moins la P300 associée à la tâche devrait être grande. Nous posons également l'hypothèse que la stimulation anodale du DLPFC par la tDCS diminue l'amplitude de la P200 associée aux distracteurs, augmente l'amplitude de la P300 associée à la tâche de *n*-back et améliore la performance à cette tâche.

Méthode

Dans cette section, nous expliquerons la méthode utilisée pour réaliser cette étude. Nous aborderons l'approbation du comité d'éthique et décrirons l'échantillon, le devis expérimental, la procédure, les stimuli et le matériel utilisés.

Approbation de l'éthique

La procédure expérimentale a été approuvée par le Comité d'éthique de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé et ont reçu une compensation de 60\$ pour leur temps.

Participants

Trente participants ont été recrutés via des publicités publiées sur les médias sociaux (p. ex. page Facebook de l'université). Les participants ont été inclus s'ils avaient entre 18 et 55 ans et avaient une vision normale ou corrigée à la normale. Les participants ont été exclus de cette étude s'ils étaient gauchers (car la latéralisation de leur cerveau peut être différente de celle des droitiers), prenaient des médicaments affectant le système nerveux ou avaient un trouble psychologique ou neurologique actuel, des antécédents d'évanouissement ou d'épilepsie ou des antécédents familiaux d'épilepsie. Cinq participants (17%) ont été exclus de l'étude en raison d'une procédure expérimentale incomplète et 3 participants (10 %) ont été exclus en raison d'un taux de réussite trop faible. Ensuite, 4 participants (13%) ont été exclus des analyses en raison

de problèmes techniques. Deux autres participants (7%) ont été exclus uniquement des analyses comportementales en raison d'un problème d'enregistrement, mais leurs données électrophysiologiques ont été conservées et ont pu être analysées. L'échantillon final était composé de 18 participants (5 hommes et 13 femmes, de 21 à 31 ans; moyenne \pm écart-type : 23,85 \pm 2,21).

Devis expérimental

Un devis intra-sujet à condition placebo a été réalisé. Les participants n'étaient pas au courant de la condition de l'expérience dans laquelle ils se trouvaient (expérimentale ou placebo). Dans la condition expérimentale, les participants recevaient la stimulation anodale de la tDCS. Dans la condition placebo, les participants ne recevaient pas cette stimulation. Les variables indépendantes sont : la condition expérimentale (placebo ou expérimentale), le temps (niveau de référence ou stimulation), le niveau de difficulté de la tâche (1-back ou 2-back) et le type de distracteur (prosodie neutre, colérique ou apeurée). Les variables dépendantes sont : l'amplitude de la P200, l'amplitude de la P300, l'exactitude et temps de réponse à la tâche de *n*-back.

Procédure et stimuli

Pendant un temps aléatoire variant entre 200 à 250 ms, une croix de fixation était présentée au centre de l'écran. Puis, un stimulus auditif émotionnel (à prosodie colérique, apeurée ou neutre) était présenté pour 1000 ms. 300 ms après le début du stimulus auditif, deux carrés jaunes ou rouges apparaissaient des deux côtés de la croix

de fixation pour 500 ms. Les carrés disparaissaient ensuite, laissant la croix de fixation seule pendant 2000 ms, ce qui laissait le temps au participant de répondre sur le clavier.

Les participants devaient rapporter, à chaque essai, la couleur du stimulus (composé de deux carrés jaunes ou rouges) vu n nombre d'essai avant. Dans la condition 1-back, ils ont dû indiquer la couleur du stimulus présenté un essai plus tôt. Dans la condition 2-back, ils ont dû rapporter la couleur du stimulus présenté deux essais plus tôt. Les participants ont été invités à regarder la croix de fixation présente au centre de l'écran en tout temps pour éviter la présence d'artéfacts dû aux mouvements oculaires. Les participants ont également été informés qu'ils allaient entendre des sons pendant la tâche, mais que ceux-ci n'étaient pas pertinents pour la réalisation de la tâche.

Les participants ont suivi deux séances de 150 minutes chacune, séparées par un intervalle d'au moins une semaine. Tous les participants ont reçu une stimulation anodale et la condition placebo dans un ordre contrebalancé entre les participants. Le même protocole a été appliqué pour les deux sessions. Après que les électrodes tDCS et le casque d'EEG aient été placés, le protocole expérimental a commencé avec un niveau de référence de 120 essais (60 essais de 1-back, 60 essais de 2-back), où les participants réalisaient la tâche sans stimulation. Ensuite, l'expérimentatrice entrait dans la salle pour expliquer au participant que nous allions mettre en marche la tDCS et qu'il pourrait ressentir des démangeaisons au niveau du cuir chevelu. Le participant était ensuite laissé seul dans la salle. L'augmentation du courant électrique livré par le tDCS peut créer une

sensation désagréable pour le participant et par conséquent le distraire, c'est pourquoi une courte vidéo de 1 minute 35 secondes a été présentée pour permettre au participant de s'habituer à la sensation de démangeaisons sur son cuir chevelu avant de recommencer la tâche. L'augmentation progressive du courant électrique jusqu'à 2mA s'est effectuée sur 60 secondes, puis le courant demeurait stable durant 20 minutes. Pour la condition placebo, le courant augmentait pour les premières 60 secondes puis diminuait immédiatement durant les 60 secondes suivantes, pour simuler les sensations de picotement de la tDCS sur le cuir chevelu. Ensuite, les participants réalisaient 360 essais de la même tâche (180 essais de 1-back et 180 essais de 2-back) durant la stimulation. Vers la fin de l'expérimentation, il y avait une diminution progressive du courant électrique sur 60 secondes.

Les distracteurs émotionnels étaient de courtes phrases en « pseudo-langage » (mots inventés) ressemblant à l'hindi. Les voix féminines et masculines ainsi que les trois prosodies (neutre, colère et peur) ont été présentées dans un ordre contrebalancé à travers les conditions. Les émotions négatives de colère et de peur ont été choisies en raison du lien qu'elles ont avec la perception de la menace et l'anxiété. Les stimuli utilisés ont été développés et validés dans une étude (Pell et al., 2009). Dans cette étude, les auteurs ont demandé à des hommes et des femmes dont la langue maternelle est l'hindi de produire des énoncés (pseudo-phrases) dans leur langue maternelle. L'enregistrement de leur voix a ensuite été présenté à un groupe d'hommes et de femmes dont la langue maternelle est également l'hindi. Ces derniers devaient ensuite

juger l'émotion du locuteur. Les résultats montrent un taux de reconnaissance d'émotion de 69%, ce qui est 5 fois plus élevé que le score qui serait attendu avec la chance dans leur tâche (Pell et al., 2009). L'objectif d'utiliser un pseudo-langage est de se concentrer sur la prosodie indépendamment de la sémantique.

Matériel

Le matériel requis comprend tout d'abord un environnement propice à la passation de la tâche, c'est-à-dire sans distractions ni bruit électrique, ainsi qu'une tDCS afin de moduler l'activité électrique. Pour mesurer nos variables, nous avons utilisé un EEG ainsi qu'un questionnaire (échelle d'anxiété de trait de Spielberg).

Environnement

Les expériences ont eu lieu dans une cage de Faraday dans le but de minimiser le bruit électrique et de permettre aux participants d'être dans un environnement insonorisé. Les participants étaient assis dans une chaise confortable face à un écran d'ordinateur de 23 pouces et répondaient en appuyant sur certains boutons préalablement identifiés sur un clavier d'ordinateur standard. Les stimuli visuels étaient affichés sur un écran d'ordinateur et les distracteurs auditifs étaient présentés à l'aide de haut-parleurs à un niveau sonore confortable pour le participant.

Stimulation transcrânienne à courant direct

Un courant direct de 2mA était généré par un stimulateur à batterie de marque NeuroConn, modèle GnbH (Ilmenau, Germany) et délivré de façon continue utilisant cinq électrodes en caoutchouc couvertes de gel conducteur (ten20). Le HD-tDCS est une technique de stimulation focalisée qui utilise différentes intensités de courant à travers les électrodes. La cathode était placée sur le site F9 (selon le système 10-20 international) et les anodes, de la plus positive à la moins positive, étaient placées sur F3, F5, F4 et Fp1.

Électroencéphalogramme

L'activité électrique du cerveau a été enregistrée grâce au système d'enregistrement BrainVision. Un montage de 64 électrodes selon le système international 10-20 a été utilisé. Le signal EEG a été prélevé à un taux d'échantillonnage de 1000Hz. Les mouvements oculaires ont été enregistrés à l'aide de deux électrodes placées sur chaque côté externe des yeux et une électrode placée sous l'œil droit. L'impédance de toutes les électrodes a été maintenue sous 10kO. Lors du prétraitement des données, réalisé à l'aide du logiciel BrainVision Analyzer, un filtre a été appliqué à tous les canaux (0,1-30hz). Les mouvements oculaires et la majeure partie du bruit électrique généré par la tDCS ont été retirés du signal à l'aide d'une analyse des composantes indépendantes (ICA). Les données ont été segmentées autour de l'arrivée du stimulus (-100 à 1000 ms) et ont ensuite été corrigées au niveau de référence (-100 à 0 ms). Si la variation du signal

sur nos électrodes d'intérêt, soit les électrodes Pz et Cz, excédait 80mV sur 100ms, l'essai était rejeté.

Échelle d'anxiété de trait de Spielberg (STAI forme Y2)

La forme Y2 du questionnaire STAI est utilisée chez l'adulte afin d'évaluer le niveau d'anxiété dans la vie générale, qui se réfère à l'anxiété de trait (Spielberger et al., 1983). Il évalue des caractéristiques générales et stables de la personnalité, sans rapport avec une situation spécifique. Il comporte 20 affirmations telles que « Je me sens bien » ou « Je me sens nerveux(se) et agité(e) ». Le participant donne une réponse sur une échelle de Likert à 4 points allant de « presque jamais » à « presque toujours ». Plus le score est élevé, plus le niveau d'anxiété de trait est élevé. Les propriétés de validité et de fidélité sont satisfaisantes (Langevin et al., 2012). Ce questionnaire a été rempli par le participant avant l'expérience.

L'impact des variables indépendantes (condition expérimentale, temps, niveau de difficulté et type de distracteur) sur les variables dépendantes (P200, P300, exactitude et temps de réponse au *n*-back) a été examiné grâce à des ANOVA à mesures répétées. Des corrélations de Pearson entre le niveau d'anxiété et toutes les variables dépendantes ont aussi été effectuées.

Résultats

Le seuil statistique a été établi à $p \leq 0,05$. L'erreur de type 1 a été contrôlée en utilisant la correction de Bonferroni pour les comparaisons multiples. Les valeurs p rapportées dans les paragraphes suivants ont donc déjà été corrigées pour les comparaisons multiples.

Des ANOVA à mesures répétées ont été réalisées séparément pour examiner l'impact des variables indépendantes (condition expérimentale, temps, niveau de difficulté, type de distracteur) sur les quatre variables dépendantes suivantes: l'amplitude du potentiel évoqué P200 (associé au traitement des stimuli émotionnels) l'amplitude du potentiel évoqué P300 (associé à la mémoire de travail), le temps de réponse et la performance à la tâche. Seuls les essais réussis ont été analysés. Des corrélations ont ensuite été effectuées avec le niveau d'anxiété de trait. Les tailles d'effet sont rapportées avec l'Eta partiel carré (η_p^2) et le d de Cohen (d'), où $\eta_p^2 = 0,02$ est petit, $\eta_p^2 = 0,13$ est moyen, $\eta_p^2 = 0,26$ est grand, $d' = 0,2$ est petit, $d' = 0,5$ est moyen et $d' = 0,8$ est grand.

Potentiels évoqués

Les potentiels évoqués P200 et P300 ont été mesurés dans le cadre de notre expérimentation. La P200 est le marqueur électrophysiologique associé au traitement des stimuli émotionnels, alors que la P300 est associé à la mémoire de travail.

P200

Pour déterminer si l'effet de la tDCS sur la P200 est significatif, l'interaction entre la condition expérimentale et le temps a été examinée. Contrairement à notre hypothèse, cette interaction s'est révélée non significative, $F(1, 17) = 1,365, p = ,26, \eta_p^2 = 0,07$. Ensuite, les résultats montrent que les distracteurs émotionnels ont eu un effet sur l'amplitude de la P200, $F(1,776, 30,199) = 4,153, p = ,03, \eta_p^2 = 0,20$.



Figure 1. Amplitude de la P200 en fonction du distracteur émotionnel.

Une différence significative a été trouvée entre la moyenne de la P200 associée aux distracteurs colériques et aux distracteurs apeurés, $t(17) = 0,672, p = 0,006, d' = 1,29$. Par contre, aucune différence significative n'a été trouvée entre la prosodie neutre et la prosodie colérique et entre la prosodie neutre et la prosodie apeurée, $t(17) = -0,531, p = ,26, d' = 1,05$ et $t(17) = 0,141, p = 1,00, d' = 0,29$ respectivement.

Ensuite, les analyses ont révélé une tendance pour un effet de la difficulté (1-back [$M = 0,352$, $ET = 0,527$], 2-back [$M = 0,648$, $ET = 0,451$] de la tâche sur l'amplitude de la P200, $F(1,17) = 4,138$, $p = ,06$, $\eta_p^2 = 0,20$. De plus, les effets principaux de la condition (placebo [$M = 0,588$, $ET = 0,622$] vs expérimentale [$M = 0,412$, $ET = 0,470$]) et du temps (niveau de référence [$M = 0,587$, $ET = 0,496$] vs stimulation [$M = 0,413$, $ET = 0,487$]) n'étaient pas significatifs, $F(1, 17) = 0,114$, $p = ,74$, $\eta_p^2 < 0,01$ et $F(1, 17) = 1,242$, $p = ,28$, $\eta_p^2 = 0,07$ respectivement. Aucun autre effet ne s'est révélé significatif (tous les $F < 1,2$, tous les $p > ,29$).

Des corrélations de Pearson ont également été menées entre le niveau d'anxiété et la différence d'amplitude entre la P200 des distracteurs neutres et colériques, neutres et apeurés ainsi que colériques et apeurés. Les données aberrantes dont le score s'éloigne de plus de 2 écart-types de la moyenne ont été éliminées. Une corrélation de Pearson marginale, mais non significative, a été retrouvée entre le niveau d'anxiété ($M = 33,235$, $ET = 6,741$) et la différence d'amplitude de la P200 associée aux distracteurs colériques versus neutres ($M = 0,531$, $ET = 1,234$), $r = ,47$, $p = ,07$. Une seule donnée aberrante a été retirée de cette analyse. Les autres corrélations étaient non significatives, $r < -,19$ et $p > ,47$.

P300

Pour déterminer si l'effet de la tDCS sur la P300 est significatif, l'interaction entre la condition expérimentale et le temps a été examinée. Les résultats montrent que cette

interaction n'était pas significative, ce qui va à l'encontre de nos hypothèses, $F(1, 17) = 0,046$, $p = ,83$, $\eta_p^2 < 0,01$. Les résultats montrent par contre que les distracteurs émotionnels ont eu un effet sur l'amplitude de la P300, $F(1,866, 31,724) = 5,033$, $p = ,01$, $\eta_p^2 = 0,23$.

Une différence significative a été trouvée entre la prosodie colérique et la prosodie apeurée, $t(17) = -0,473$, $p = 0,1$, $d' = 0,79$. Tel que le présente la Figure 2, l'amplitude de la P300 associée aux distracteurs apeurés était plus importante que l'amplitude de la P300 associée aux distracteurs colériques. Aucune différence significative n'a été trouvée entre la prosodie neutre et la prosodie colérique alors qu'une tendance est trouvée entre la prosodie neutre et la prosodie apeurée, $t(17) = -0,054$, $p = 1,000$, $d' = 0,09$ et $t(17) = -0,528$, $p = 0,066$, $d' = 0,83$ respectivement.

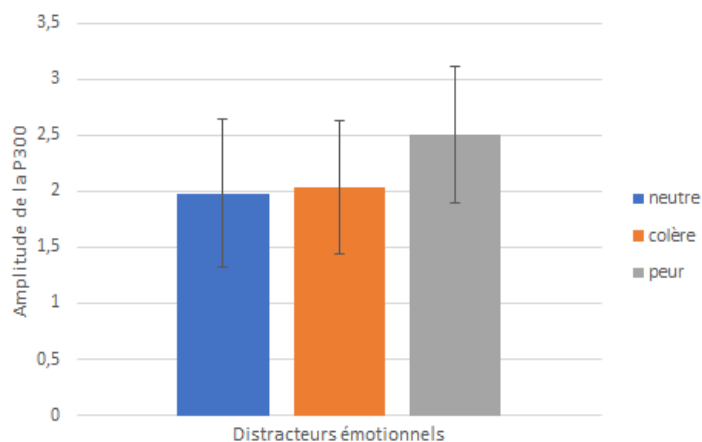


Figure 2. Amplitude de la P300 en fonction du distracteur émotionnel.

Ensuite, aucun effet de la difficulté (1-back [$M = 2,252$, $ET = 607$] vs 2-back [$M = 2,092$, $ET = 0,641$]) n'a été observé sur la P300, ce qui va à l'encontre de ce qui est attendu, $F(1,17) = 0,403$, $p = ,53$, $\eta_p^2 = 0,02$. L'effet principal de la condition (placebo [$M = 2,420$, $ET = 0,633$] vs expérimentale [$M = 1,924$, $ET = 0,658$]) n'était pas significatif, $F(1,17) = 1,409$, $p = 0,252$, $\eta_p^2 = 0,08$. L'effet principal du temps (niveau de référence [$M = 1,762$, $ET = 0,614$] vs stimulation [$M = 2,582$, $ET = 0,626$]), était, quant à lui, significatif, $F(1,17) = 15,049$, $p = ,001$, $\eta_p^2 = 0,47$. Cela signifie que la P300 était plus élevée après le niveau de référence. Aucun autre effet ne s'est révélé significatif (tous les $F < 2,14$, tous les $p > ,16$).

De plus, des corrélations de Pearson ont été menées entre le niveau d'anxiété et la différence d'amplitude entre la P300 associée aux distracteurs neutres et colériques, neutres et apeurés ainsi que colériques et apeurés. Aucune corrélation ne s'est révélée significative (tous les $r < ,31$, tous les $p > ,23$).

Comportemental

Notre mesure comportementale de la mémoire de travail comprenait les temps de réponse et l'exactitude à la tâche.

Temps de réponse

Pour déterminer si l'effet de la tDCS sur le temps de réponse moyen est significatif, l'interaction entre la condition expérimentale et le temps a été examinée. Les résultats

montrent que l'interaction n'est pas significative, $F(1, 15) = 0,209, p = ,65, \eta_p^2 = 0,01$. Cependant, l'effet des distracteurs émotionnels sur le temps de réponse est, lui, significatif, $F(2, 30) = 6,852, p = ,004, \eta_p^2 = 0,31$.

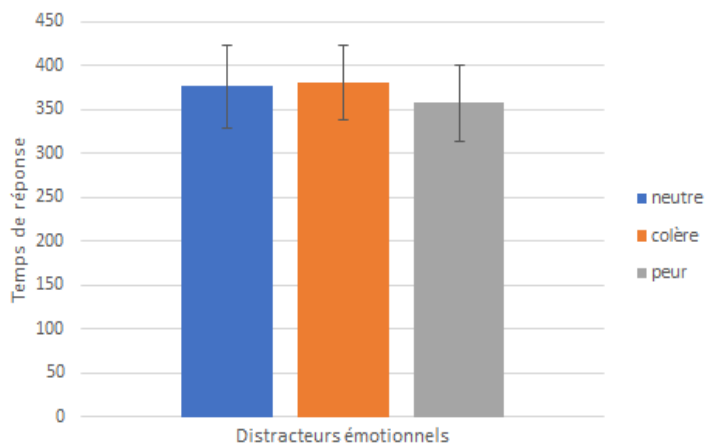


Figure 3. Temps de réponse en fonction du distracteur émotionnel.

Il existe une différence significative entre les distracteurs neutres et apeurés ainsi qu'entre les distracteurs colériques et apeurés, $t(15) = 18,603, p = ,03, d' = 0,41$ et $t(15) = 23,120, p = ,02, d' = 0,53$ respectivement. Tel que le présente la Figure 3, les temps de réponse associés aux distracteurs neutres et colériques sont plus longs que ceux associés aux distracteurs apeurés. La différence entre les distracteurs neutres et colériques est, quant à elle, non significative, $t(15) = -4,517, p = 1,00, d' = 0,15$. L'effet de la difficulté de la tâche sur le temps de réponse est également significatif, $F(1, 15) = 11,189, p = ,004, \eta_p^2 = 0,43$. Toutefois, l'effet va dans le sens inverse de celui que nous attendions, c'est-à-dire que, tel que présenté par la Figure 4, le temps de réponse associé au 1-back est plus long que le temps de réponse associé au 2-back.

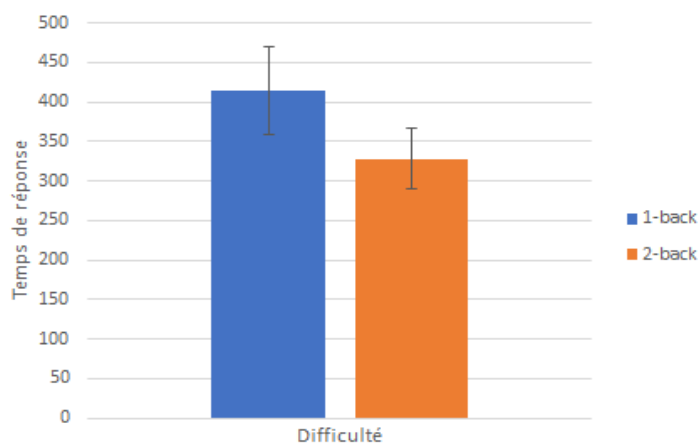


Figure 4. Temps de réponse en fonction de la difficulté de la tâche.

Les effets principaux de la condition (placebo [$M = 367,972$, $ET = 40,361$] vs expérimentale [$M = 374,731$, $ET = 59,866$]) et de le temps (niveau de référence [$M = 355,209$, $ET = 41,114$] vs stimulation [$M = 387,494$, $ET = 55,082$]), ne sont pas significatifs, $F(1,15) = 0,022$, $p = 0,883$, $\eta_p^2 < 0,01$ et $F(1,15) = 0,974$, $p = 0,339$, $\eta_p^2 = 0,06$ respectivement. Aucun autre effet ne s'est révélé significatif (tous les $F < 2,8$, tous les $p > ,08$)

Des corrélations de Pearson ont aussi été menées entre le niveau d'anxiété et la différence du temps de réponse pour les distracteurs neutres et colériques, neutres et apeurés ainsi que colériques et apeurés. Aucune corrélation ne s'est révélée significative (tous les $r < ,35$, tous les $p > ,20$)

Exactitude

Pour déterminer si l'effet de la tDCS sur le taux de réussite est significatif, l'interaction entre la condition expérimentale et le temps a été examinée. Les résultats montrent que l'interaction n'est pas significative, $F(1,15) = 0,98$, $p = ,76$, $\eta_p^2 = 0,06$. De plus, l'effet des distracteurs émotionnels (neutre [$M = 0,843$, $ET = 0,035$] vs colère [$M = 0,849$, $ET = 0,036$] vs peur [$M = 0,842$, $ET = 0,035$]) sur le taux de réussite n'est pas non plus significatif, $F(2,30) = 0,682$, $p = ,51$, $\eta_p^2 = 0,04$. Finalement, contrairement à ce qui est attendu, l'effet de la difficulté de la tâche (1-back [$M = 0,844$, $ET = 0,034$] vs 2-back [$M = 0,846$, $ET = 0,037$]) sur le taux de réussite n'est pas non plus significatif, $F(1,15) = 0,051$, $p = ,83$, $\eta_p^2 < 0,01$. L'effet principal du temps (niveau de référence [$M = 0,862$, $ET = 0,037$] vs stimulation [$M = 0,827$, $ET = 0,037$]) n'est pas significatif, $F(1,15) = 2,612$, $p = ,13$, $\eta_p^2 = 0,15$. L'effet principal de la condition placebo [$M = 0,926$, $ET = 0,14$] et expérimentale [$M = 0,763$, $ET = 0,073$] est, quant à lui, significatif, $F(1,15) = 4,453$, $p = ,05$, $\eta_p^2 = 0,23$. Le taux d'exactitude était plus élevé lors de la condition placebo comparativement à la condition expérimentale. Chaque condition inclut le niveau de référence ainsi que la stimulation. Aucun autre effet ne s'est révélé significatif (tous les $F < 1,98$, tous les $p > 0,16$).

Des corrélations de Pearson ont également été menées entre le niveau d'anxiété et l'ampleur de la différence d'amplitude entre la performance associée aux distracteurs neutres et colériques, neutres et apeurés ainsi que colériques et apeurés. Aucune corrélation ne s'est révélée significative (tous les $r < ,19$, tous les $p > ,51$).

Discussion

Nous avons utilisé la tDCS en combinaison avec l'EEG afin de vérifier au niveau électrophysiologique et comportemental 1) l'effet de la neurostimulation sur la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels, 2) l'effet des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail et 3) le lien entre l'anxiété de trait et ces variables. Nos résultats se résument ainsi : 1) nous n'avons trouvé aucun effet de la tDCS sur la mémoire de travail (mesurée par la P300, les temps de réponse et l'exactitude à la tâche de *n*-back), ni sur le traitement des distracteurs émotionnels (mesuré par la P200), 2) nous avons trouvé un effet des distracteurs émotionnels sur la P300, sur la P200 et sur les temps de réponse à la tâche de *n*-back, mais pas sur l'exactitude et 3) nous avons trouvé une corrélation marginale mais non significative entre l'anxiété de trait et l'écart d'amplitude de la P200 des distracteurs de colère et de peur.

Absence d'effet de la tDCS

Nous n'avons trouvé aucun effet de la tDCS sur nos variables, c'est-à-dire la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels. Dans les paragraphes subséquents, des pistes explicatives seront proposées.

Mémoire de travail

Contrairement à nos hypothèses, aucun effet de la tDCS n'a été retrouvé sur la P300, sur les temps de réponse ou l'exactitude à la tâche de *n*-back. Les tailles d'effet

allaient de presque nulles à petites ($\eta_p^2 < 0,01$, $\eta_p^2 = 0,01$ et $\eta_p^2 = 0,06$ respectivement). Ce résultat pourrait s'expliquer par le manque de défi que représentait notre tâche. Au niveau électrophysiologique, contrairement à ce qui était attendu, aucun effet de la difficulté n'a été observé sur la P300 ni sur l'exactitude à la tâche de n-back. L'amplitude de la P300 a été liée à maintes reprises dans la littérature à la charge en mémoire de travail mesurée par une tâche de n-back (Pergher et al., 2019; Watter et al., 2003). Plus la tâche est exigeante, plus la P300 est censée être petite. La difficulté de notre tâche n'était probablement pas suffisamment élevée pour engendrer des changements dans la P300; en effet, le taux de réussite de la condition 1-back était de 84,4% alors que celui de la condition 2-back était de 84,6%. Les auteurs d'une autre étude (Scharinger et al., 2017) ont trouvé des taux d'exactitude similaires aux nôtres pour ce qui est du 1-back (89%) et du 2-back (87%). Toutefois, contrairement à notre étude, ils ont également utilisé une condition 3-back (77%) et 4-back (74%). Étant donné que ces auteurs ont trouvé que la différence entre le taux d'exactitude du 1-back et du 2-back n'était pas significative, ils ont plutôt décidé de conserver pour leurs analyses uniquement les conditions 1-back et 3-back. Ainsi, il semblerait que la condition 2-back ne sollicite pas suffisamment la mémoire de travail en comparaison avec le 1-back. Il est donc possible que l'absence d'effet de la tDCS sur la mémoire de travail que nous retrouvons dans notre étude soit dû au fait que nous ayons utilisé une condition 2-back alors que celle-ci n'est pas suffisamment exigeante. Nous recommandons donc pour les futures études d'utiliser une condition plus difficile que le 2-back, tel que le 3-back ou le 4-back, pour stimuler davantage la mémoire de travail des participants.

Il est aussi possible que l'absence d'effet de la tDCS sur la mémoire de travail puisse simplement s'expliquer par l'inefficacité de la tDCS. Une méta-analyse très récente suggère la possibilité que la stimulation anodale de la tDCS n'ait aucun effet sur la performance au *n*-back (de Boer et al., 2021). Sur les 18 études identifiées, seulement deux ont trouvé un effet positif de la stimulation anodale, alors que 13 n'ont trouvé aucun effet. Trois études ont même trouvé que la stimulation anodale affectait négativement la performance au *n*-back. Il se pourrait donc que nous n'ayons pas trouvé d'effet de la tDCS pour la simple et bonne raison que la tDCS n'est pas efficace pour bonifier la mémoire de travail.

Traitement des distracteurs émotionnels

Dans notre étude, aucun effet de la tDCS n'a été retrouvé sur la P200, notre marqueur électrophysiologique du traitement des distracteurs émotionnels. La taille d'effet était petite ($\eta_p^2 = 0,07$). À notre connaissance, aucune étude n'avait encore jamais utilisé une combinaison de l'EEG et de la tDCS dans le but de vérifier si la tDCS peut affecter le traitement des distracteurs émotionnels au niveau neuronal. Dans la littérature, les auteurs ayant investigué l'effet de la tDCS sur le biais attentionnel envers les distracteurs émotionnels ont plutôt utilisé des mesures comportementales. Dans une des études, les chercheurs ont appliqué la tDCS sur le DLPFC des participants. Aucun effet de la tDCS sur le biais attentionnel n'a été retrouvé, sauf chez un sous-groupe de participants dont le biais attentionnel était plus important (Wolkenstein et al., 2021). Une étude semblable menée chez des participants présentant un épisode dépressif majeur

vient appuyer ces résultats; chez ces patients, la tDCS appliquée sur le DLPFC avait permis de diminuer leur biais attentionnel pour les distracteurs émotionnels négatifs. Ce même effet n'était toutefois pas présent chez les participants sains (Wolkenstein & Plewnia, 2013). Bref, il semble que la tDCS puisse permettre de diminuer le biais attentionnel pour des distracteurs émotionnels, mais seulement chez les individus présentant un biais attentionnel excessif. Dans ce contexte, le fait que nous n'ayons trouvé aucun effet de la tDCS sur la P200 n'est donc pas si surprenant puisque notre échantillon était composé de jeunes adultes universitaires et en santé. Une réplication de notre étude de potentiels évoqués sur une population clinique (p. ex. trouble anxieux) pourrait donc être pertinente pour vérifier cette hypothèse.

Effet des distracteurs émotionnels

Il a été trouvé que les distracteurs colériques engendraient une P200 significativement supérieure aux distracteurs apeurés, et ce, avec une très grande taille d'effet ($d' = 1,29$). Ce résultat démontre que les distracteurs colériques sont traités précocement par notre cerveau de façon plus importante que les distracteurs apeurés. Ensuite, aucune différence significative n'a été trouvée entre les distracteurs neutres et colériques; toutefois, la taille d'effet était, encore une fois, très grande ($d' = 1,05$). Ces résultats vont dans le sens de la littérature. En effet, une autre étude, comparant l'amplitude de la P200 pour la prosodie colérique, joyeuse et neutre, a en effet démontré que la prosodie colérique augmentait significativement la P200 en comparaison avec la prosodie neutre (Iredale et al., 2013). Ces résultats soutiennent la théorie que le

traitement des stimuli menaçants est priorisé par rapport aux stimuli neutres (Okon-Singer, 2018). La peur, cependant, n'a pas engendré cette augmentation de la P200. Dans une étude menée chez les individus anxieux, où le biais attentionnel est plus important que chez la population saine, on retrouve effectivement que les stimuli de peur n'engendrent pas une augmentation de la P200 comme le font les stimuli de colère (Bar-Haim et al., 2005). Selon les résultats de notre étude, cela semble également s'appliquer à la population saine.

Ensuite, il a été trouvé que les distracteurs apeurés engendraient une P300 significativement plus élevée que les distracteurs colériques, et ce, avec une grande taille d'effet ($d' = 0,79$). Un effet marginal a aussi été trouvé entre les distracteurs apeurés et neutres avec, encore une fois, une grande taille d'effet ($d' = 0,83$). Ces effets n'étaient pas attendus. Nous nous attendions plutôt à ce que les distracteurs colériques diminuent la P300, puisqu'il a été trouvé que ceux-ci augmentent la P200. Nous n'avons pas été capables de trouver un résultat équivalent dans la littérature ni une piste d'explication à ce résultat.

En lien avec l'effet précédemment trouvé, les analyses montrent que les distracteurs apeurés engendraient un temps de réponse significativement plus petit que les distracteurs neutres et colériques, et ce, avec des tailles d'effet moyennes ($d' = 0,41$ et $d' = 0,53$ respectivement). Il pourrait donc exister un lien entre l'augmentation de l'amplitude de la P300 et la diminution des temps de réponse à la tâche de *n*-back. Ce

résultat a également été trouvé dans une autre étude, où les auteurs ont trouvé une corrélation négative entre la P300 et les temps de réponse lors d'une tâche de n -back (Ozen et al., 2013).

Effet de la difficulté de la tâche

Nous avons trouvé un effet de la difficulté de la tâche sur une de nos mesures comportementales de mémoire de travail et sur notre mesure électrophysiologique du traitement des distracteurs émotionnels.

Mémoire de travail

L'effet de la difficulté de la tâche sur le temps de réponse s'est révélé significatif, avec une très grande taille d'effet ($\eta_p^2 = 0,43$). En revanche, l'effet s'est produit dans le sens inverse de celui que nous attendions. Les participants ont été plus rapides lorsque la tâche était plus complexe que lorsqu'elle était plus facile. Une explication possible de ce phénomène est que puisque la condition 1-back était très facile, les participants étaient peu stimulés et donc peu alertes. Un défi supplémentaire semble avoir été bénéfique au niveau de leur activation et de leur engagement envers la tâche.

Traitement des distracteurs émotionnels

Finalement, les analyses ont révélé une tendance à ce que la difficulté de la tâche affecte l'amplitude de la P200, et ce, avec une grande taille d'effet ($\eta_p^2 = 0,20$). Plus la difficulté était élevée, plus l'amplitude de la P200 associée aux distracteurs était grande.

Selon la *load theory of attention*, l'ampleur avec laquelle les distracteurs sont traités par le cerveau dépend de la charge cognitive engendrée par la tâche effectuée (Lavie et al., 2004). La capacité à prioriser les informations pertinentes reliées à la tâche et à ignorer les distracteurs dépendrait de la disponibilité des fonctions exécutives. Les fonctions exécutives représentent un ensemble de processus cognitifs de haut niveau permettant un comportement flexible et adapté au contexte (Blair, 2016). Elles comprennent, entre autres, la mémoire de travail et l'inhibition. Selon les auteurs de la *load theory of attention*, augmenter la charge cognitive d'une tâche de mémoire de travail résulterait en une augmentation du traitement des stimuli distracteurs, puisqu'il n'y aurait pas suffisamment de ressources cognitives restantes pour les inhiber. Cette théorie permet d'expliquer que, dans notre étude, l'amplitude de la P200 est marginalement plus élevée dans la condition 2-back que dans la condition 1-back. Cette explication contredit toutefois l'hypothèse que notre tâche de n-back n'était pas suffisamment difficile. Néanmoins, la *load theory of attention* offre une piste d'explication possible.

Lien entre l'anxiété et la P200

Une corrélation modérée marginale a été trouvée entre l'anxiété de trait et l'écart d'amplitude de la P200 des distracteurs colériques et apeurés ($r = ,47$). Ce résultat suggère la possibilité que plus l'anxiété de trait d'un individu est grande, plus la P200 associée aux distracteurs colériques sera grande; autrement dit, plus l'individu traitera les distracteurs colériques au niveau neuronal. D'autres études vont également dans ce sens; effectivement, certaines montrent que les individus anxieux ont une plus grande

amplitude de la P200 face aux stimuli émotionnels négatifs, ce qui reflète une hypervigilance face à ces stimuli, et donc, un plus grand traitement émotionnel, en comparaison avec des stimuli neutres (Dennis & Chen, 2007; Mercado et al., 2009). D'autres études ont montré que les individus anxieux, en comparaison avec les individus non anxieux, montrent une plus grande amplitude de la P200 face à un visage colérique, mais pas face aux visages apeurés ou neutres (Bar-Haim et al., 2005). En outre, il est démontré que l'amplitude de la P200 des individus anxieux est plus grande pour les visages colériques que pour ceux apeurés, alors que cet effet n'est pas retrouvé chez les non anxieux (Rossignol et al., 2013). Ces résultats neurophysiologiques démontrent qu'il y a un lien entre le niveau d'anxiété et l'amplitude de la composante de potentiel évoqué P200 face à des stimuli émotionnels colériques. Nos résultats appuient donc l'idée que l'anxiété est liée au biais attentionnel et ajoutent une précision que ce biais est lié au traitement très précoce des stimuli colériques.

Limites de notre étude

Notre étude comprend certaines limites. Tout d'abord, notre échantillon est modeste ($N=18$) et est peu représentatif de la population générale, ce qui limite la généralisation de nos résultats. En effet, nous n'avons recruté que 5 hommes (contre 13 femmes) et l'ensemble de notre échantillon était composé d'étudiants universitaires, pour la plupart aux cycles supérieurs, et âgés dans la vingtaine. Néanmoins, le passage de 30 participants recrutés à 18 participants analysés s'explique en grande partie par les problèmes techniques rencontrés qui sont hors de notre contrôle.

Une autre faiblesse de notre étude est la validité écologique de nos distracteurs émotionnels. Dans le but d'étudier expérimentalement l'effet des émotions sur la mémoire de travail, nous avons opté pour des stimuli standardisés ayant été validés dans une précédente étude (Pell et al., 2009). Le problème avec l'utilisation de ce type de stimuli standardisés est leur importance affective; selon plusieurs auteurs, pour un participant sain, elle sera généralement assez faible (Schweizer et al., 2019). Leur impact sur la performance d'une tâche sera limité, et donc difficile à détecter et à répliquer. L'utilisation de stimuli écologiques serait donc à privilégier. Cela reste un défi important pour tous, puisqu'en contexte expérimental, les stimuli se doivent d'être standardisés.

Conclusion

Pour conclure, la combinaison de l'EEG et de la tDCS nous a permis d'investiguer au niveau neuronal l'effet des distracteurs émotionnels sur la mémoire de travail et comment la stimulation anodale par la tDCS module cet effet. Nous avons également pu examiner le lien entre le niveau d'anxiété et ces variables. Les objectifs de cette étude ont donc été atteints. Toutefois, nos hypothèses n'ont été que partiellement corroborés. Nos analyses ont montré que la tDCS n'a eu aucun effet ni sur la mémoire de travail (mesurée par la P300, les temps de réponse et l'exactitude à la tâche de *n*-back), ni sur le traitement des distracteurs émotionnels (mesuré par la P200), ce qui va à l'encontre de nos hypothèses. Nous avons tout de même trouvé un effet des distracteurs émotionnels sur la P300, sur la P200 et sur les temps de réponse à la tâche de *n*-back, mais pas sur l'exactitude à cette tâche. Plus précisément, les distracteurs colériques ont augmenté la P200, ce qui va dans le sens de nos hypothèses. Ensuite, les distracteurs apeurés ont augmenté la P300 et diminué les temps de réponse, ce qui n'était pas attendu. Finalement, nous avons trouvé une corrélation marginale, mais non significative, entre l'anxiété de trait et l'écart d'amplitude de la P200 des distracteurs de colère et de peur. De plus amples études pourront évaluer la suggestion que plus l'anxiété de trait d'une personne est grande, plus la P200 associée aux distracteurs colériques est grande.

Notre étude permet de remettre en question l'efficacité de la tDCS pour moduler les fonctions cognitives chez une population saine. En effet, l'effet de la tDCS sur nos

variables s'est révélé non significatif, et ce, au niveau comportemental et neuronal. Nos conclusions sont importantes puisque les résultats des études sur la tDCS sont mitigées et que notre étude abordait un aspect que peu ont investigué, c'est-à-dire l'impact de la tDCS sur les potentiels évoqués.

Ensuite, notre étude a permis de mieux comprendre les mécanismes neuronaux liés à la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels chez une population saine. Nous avons pu répliquer certains résultats de la littérature, soit l'augmentation de la P200 par les distracteurs colériques comparativement aux distracteurs apeurés, le lien négatif entre l'amplitude de la P300 et les temps de réponse au *n*-back et la corrélation marginale entre l'anxiété et la P200 associée aux distracteurs colériques. Un de nos résultats allant à l'encontre de nos hypothèses, soit l'augmentation de la P300 par les distracteurs apeurés, nous remet en question par rapport à notre compréhension du lien entre la P200 et la P300. De futures études pourraient se pencher sur le lien entre ces composantes afin d'améliorer davantage notre compréhension de l'interaction entre les mécanismes neuronaux sous-tendant la mémoire de travail et le traitement des distracteurs émotionnels.

Références

- American Psychological Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorder DSM-5 (5e éd.)*.
- Andrews, S. C., Hoy, K. E., Enticott, P. G., Daskalakis, Z. J. & Fitzgerald, P. B. (2011). Improving working memory: the effect of combining cognitive activity and anodal transcranial direct current stimulation to the left dorsolateral prefrontal cortex, *Brain Stimulation*, 4(2), 84-89.
- Baddeley, A. D. (2010). Working memory, *Current Biology*, 20(4), 136-140.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 8, 47-89.
- Bailey, K., Mlynarczyk, G. & West, R. (2016). Slow Wave Activity Related to Working Memory Maintenance in the N-Back Task, *Journal of Psychophysiology*, 30(4), 141-154.
- Bar-Haim, Y., Lamy, D. & Glickman, S. (2005). Attentional bias in anxiety: A behavioral and ERP study, *Brain and Cognition*, 59, 11-22.
- Bar-Haim, Y., Lamy, D., Pergamin, L., Bakermans-Kranenburg, M. J. & van IJzendoorn, M. H. (2007). Threat-Related Attentional Bias in Anxious and Nonanxious Individuals: A Meta-Analytic Study, *Psychological Bulletin*, 133(1), 1-24.
- Bishop, S. J. (2009). Trait anxiety and impoverished prefrontal control of attention, *nature neuroscience*, 12(1), 92-98.
- Blair, C. (2016). Developmental Science and Executive Function, *Current Directions in Psychological Science*, 25(1), 3-7.
- Brosch, T., Pourtois, G. & Sander, D. (2010). The perception and categorisation of emotional stimuli: A review. *Cognition and Emotion*, 24(3), 377-400.
- Brunoni, A. R. & Vanderhasselt, M. (2014). Working memory improvement with non-invasive brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex : A systematic review and meta-analysis, *Brain and Cognition*, 86, 1-9.

- Carretié, L., Mercado, F., Tapia, M. & Hinojosa, J. A. (2001). Emotion, attention, and the 'negativity bias', studied through event-related potentials, *International Journal of Psychophysiology*, *41*(1), 75-85.
- Chrysikou, E. G., Berryhill, M. E., Bikson, M. & Coslett, H. B. (2017). Editorial: Revisiting the Effectiveness of Transcranial Direct Current Brain Stimulation for Cognition: Evidence, Challenges, and Open Questions, *frontiers in Human Neuroscience*, *11*(248), 1-3.
- Clarke, R. & Johnstone, T. (2013). Prefrontal inhibition of threat processing reduces working memory interference, *frontiers in Human Neuroscience*, *7*(228), 1-17.
- Coffman, B. A., Clark, V. P. & Parasuraman, R. (2014). Battery powered thought: Enhancement of attention, learning, and memory in healthy adults using transcranial direct current stimulation, *NeuroImage*, *85*(3), 895-908.
- de Boer, N.S., Schluter, R.S., Daams, J.G., van der Werf, Y.D., Goudriaan, A.E. & van Holst, R.J. (2021). The effect of non-invasive brain stimulation on executive functioning in healthy controls: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Review*. *125*, 122-147. doi: 10.1016/j.neubiorev.2021.01.013.
- Dedoncker, J., Brunoni, A. R., Baeken, C. & Vanderhasselt, M. (2016). A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Healthy and Neuropsychiatric Samples: Influence of Stimulation Parameters, *Brain Stimulation*, *9*(4), 501-517.
- Deldar, Z., Rustamov, N., Bois, S., Blanchette, I. & Piché, M. (2018). Enhancement of pain inhibition by working memory with anodal transcranial direct current stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex, *The Journal of Physiological Sciences*, *68*(6), 825-836.
- Dennis, T. A. & Chen, C. (2007). Neurophysiological mechanisms in the emotional modulation of attention : The interplay between threat sensitivity and attentional control, *Biological Psychology*, *76*(1), 1-10.
- Dolcos, F. & McCarthy, G. (2006). Brain Systems Mediating Cognitive Interference by Emotional Distraction, *The Journal of Neuroscience*, *26*(7), 2072-2079.
- Dores, A. R., Barbosa, F., Carvalho, I. P., Almeida, I., Guereiro, S., da Rocha, B. M., de Sousa, L. & Castro-Caldas, A. (2017). Study of behavioral and neural bases of visuo-spatial working memory with an fMRI paradigm based on an n-back task, *Journal of Neuropsychology*, *11*(1), 122-134.

- Eldar, S., Yankelevitch, R., Lamy, D. & Bar-Haim, Y. (2010). Enhanced neural reactivity and selective attention to threat in anxiety, *Biological Psychology*, 85(2), 252-257.
- Fregni, F., El-Hagrassy, M. M., Pacheco-Barrios, K., Carvalho, S., Leite, J., Simis, M., Brunelin, J., Nakamura-Palacios, E. M., Marangolo, P., Venkatasubramanian, G., San-Juan, D., Caumo, W., Bikson, M. & Brunoni, A. R. (2021). Evidence-based guidelines and secondary meta-analysis for the use of transcranial direct current stimulation in neurological and psychiatric disorders, *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 24(4), 256-313.
- Han, H. Y., Gan, T., Li, P., Li, Z. J., Guo, M., & Yao, S. M. (2014). Attentional bias modulation by reappraisal in patients with generalized anxiety disorder : an event-related potential study, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 47(7), 576-583.
- Hill, A. T., Fitzgerald, P. B. & Hoy, K. E. (2016). Effects of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory: A Systematic Review and Meta-Analysis of Findings from Healthy and Neuropsychiatric Populations, *Brain Stimulation*, 9(2), 197-208.
- Hill, A. T., Rogasch, N. C., Fitzgerald, P. B. & Hoy, K. E. (2019). Impact of concurrent task performance on transcranial direct current stimulation (tDCS)-Induced changes in cortical physiology and working memory, *Cortex*, 113, 37-57.
- Hsu, T-Y., Tseng, P., Liang, W-K., Cheng, S-K. & Juan, C-H. (2014). Transcranial direct current stimulation over right posterior parietal cortex changes prestimulus alpha oscillation in visual short-term memory task, *Neuroimage*, 98,306-313.
- Iredale, J. M., Rushby, J. A., McDonald, K., Dimoska-Di Marco, A. & Swift, J. (2013). Emotion in voice matters: Neural correlates of emotional prosody perception, *International Journal of Psychophysiology*, 89(3), 483-490.
- Ironside, M., O'Shea, J., Cowen, P. J. & Harmer, C. J. (2016). Frontal Cortex Stimulation Reduces Vigilance to Threat: Implications for the Treatment of Depression and Anxiety, *Biological Psychiatry*, 79(10), 823-830.
- Jacobson, L., Koslowsky, M. & Lavidor, M. (2012). tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: a meta-analytical review, *Experimental Brain Research*, 216(1), 1-10.
- Kearney-Ramos, T.E., Fausett, J.S., Guess, J.L., Reno, A., Peraza, J., Kilts, C.D. & James, G.A. (2014). Merging clinical neuropsychology and functional neuroimaging to evaluate the construct validity and neuro network engagement of

- the n-back task, *Journal of the International Neuropsychological Society*, 20(7), 736-750.
- Kensinger, E. A. & Corkin, S. (2003). Effect of Negative Emotional Content on Working Memory and Long-Term Memory, *Emotion*, 3(4), 378-393.
- Langevin, V., Boini, S., François, M. & Riou, A. (2012). Inventaire d'anxiété État-Trait Forme Y, *INRS*, 131.
- Lavie, N., Hirst, A., de Fockert, J. W., & Viding, E. (2004). Load Theory of Selective Attention and Cognitive Control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 339–354.
- Mancuso, L. E., Ilieva, I. P., Hamilton, R. H. & Farah, M. J. (2016). Does Transcranial Direct Current Stimulation Improve Healthy Working Memory?: A Meta-analytic Review, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(8), 1063-1089.
- Mercado, F., Carretié, L., Hinjosa, J. A. & Penacoba, C. (2009). Two successive phases in the threat-related attentional response of anxious subjects: neural correlates, *Depression and Anxiety*, 26(12), 1141-1150.
- Mercado, F., Carretié, L., Tapia, M. & Gomez-Jarabo, G. (2006). The influence of emotional context on attention in anxious subjects: neurophysiological correlates, *Journal of Anxiety Disorders*, 20(1), 72-84.
- Moran, T. P. (2016). Anxiety and working memory capacity: A meta-analysis and narrative review, *Psychological Bulletin*, 142(8), 831-864.
- Okon-Singer, H. (2018). The role of attention bias to threat in anxiety: mechanisms, modulators and open questions, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 26-30.
- Owen, A. M., McMillan, K. M. Laird, A. R. & Bullmore, D. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies, *Human Brain Mapping*, 25(1), 46-59.
- Ozen, L. J., Itier, R. J., Preston, F. F. & Fernandes, M. A. (2013). Long-term working memory deficits after concussion: Electrophysiological evidence. *Brain Injury*, 27(11), 1244-1255.
- Paulmann, S., Bleichner, M. & Kotz, S. A. (2013). Valence, arousal, and task effects in emotional prosody processing, *frontiers in Psychology*, 4(345), 1-10.
- Peers, P. V., Simons, J. S. & Lawrence, A. D. (2013). Prefrontal control of attention to threat, *frontiers in Human Neuroscience*, 7(24), 1-12.

- Pell, M. D., Rothermich, K., Liu, P., Paulmann, S., Sethi, S. & Rigoulot, S. (2015). Preferential decoding of emotion from human non-linguistic vocalizations versus speech prosody, *Biological Psychology*, *111*, 14-25.
- Pell, M. D., Paulmann, S., Dara, C., Alasser, A. & Kotz, S. A. (2009). Factors in the recognition of vocally expressed emotions: A comparison of four languages, *Journal of Phonetics*, *37*, 417-435.
- Pergher, V., Wittevrongel, B., Tournoy, J., Schoenmakers, B., Van Hulle, M. M. (2019). Mental workload of young and older adults gauged with ERPs and spectral power during N-Back task performance. *Biological Psychology*, *146*.
- Pisoni, A., Mattavelli, G., Papagno, C., Rosanova, M., Casali, A. G. & Romero Lauro, L. J. (2017). Cognitive Enhancement Induced by Anodal tDCS Drives Circuit-Specific Cortical Plasticity, *Cerebral Cortex*, *28*(4), 1-9.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b, *Clinical Neurophysiology*, *118*(10), 2128-2148.
- Quark, M., London, R. E. & Talsma, D. (2015). A multisensory perspective of working memory, *frontiers in Human Neuroscience*, *9*(197).
- Rodriguez-Jimenez, R. Avila, C., Garcia-Navarro, C., Bagney, A., de Aragon, A. M., Ventura-Campos, N., Martinez-Gras, I., Forn, C., Ponce, G., Rubio, G., Jimenez-Arriero, M. A., Palomo, T. (2009). Differential dorsolateral prefrontal cortex activation during a verbal n-back task according to sensory modality, *Behavioural Brain Research*, *205*(1), 299-302.
- Rossignol, M., Campanella, S., Bissot, C. & Philippot, P. (2013). Fear of negative evaluation and attentional bias for facial expressions: An event-related study. *Brain and Cognition*, *82*, 344-352.
- Sanchez-Lopez, A., Vanderhasselt, M., Allaert, J., Baeken, C. & de Raedt, R. (2018). Neurocognitive mechanisms behind emotional attention: Inverse effects of anodal tDCS over the left and right DLPFC on gaze disengagement from emotional face, *Cognitive, Affective, & Behavioral Neurosciences*, *18*(3), 485-494.
- SanMiguel, I., Corral, M-J. & Escera, C. (2008). When Loading Working Memory Reduces Distraction: Behavioral and Electrophysiological Evidence from an Auditory-Visual Distraction Paradigm, *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(7), 1131-1145.

- Scharinger, C., Soutschek, A., Schubert, T. & Gerjets, P. (2017). Comparison of the working memory load in n-back and working memory span tasks by means of EEG frequency band power and P300 amplitude, *Frontiers in human neuroscience*, *11*(6).
- Schirmer, A., Chen, C., Ching, A. & Tan, L. (2013). Vocal emotions influence verbal memory: Neural correlates and interindividual differences, *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, *13*(1), 80-93.
- Schweizer, S., Satpute, A. B., Atzil, S., Field, A. P., Hitchcock, C., Black, M., ... Dalglish, T. (2019). The impact of affective information on working memory: A pair of meta-analytic reviews of behavioral and neuroimaging evidence, *Psychological Bulletin*, *124*(6), 566-609.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R., Vagg, P. R., & Jacobs, G. A. (1983). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Stagg, C. J., Antal, A., & Nitsche, M. A. (2018). Physiology of Transcranial Direct Current Stimulation, *Journal of ECT*, *34*(3), 144-152.
- Stout, D. M., Shackman, A. J. & Larson, C. L. (2013). Failure to filter: anxious individuals show inefficient gating of threat from working memory, *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*(58), 1-10.
- Sur, S. & Sinha, V. K. (2009). Event-related potential : An overview, *Industrial Psychiatry Journal*, *18*(1), 70-73.
- Thair, H., Holloway, A. L., Newport, R. & Smith, A. D. (2017). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS): A Beginner's Guide for Design and Implementation, *frontiers in Neuroscience*, *11*(641), 1-13.
- van Dillen, L. F. & Derks, B. (2012). Working Memory Load Reduces Facilitated Processing of Threatening Faces: An ERP Study, *Emotion*, *12*(6), 1340-1349.
- Vuilleumier, P. (2005). How brains beware: neural mechanisms of emotional attention, *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(12), 585-594.
- Watter, S., Geffen, G. M. & Geffen, L. B. (2003). The n-back as a dual-task: P300 morphology under divided attention, *Psychophysiology*, *38*(6), 998-1003.
- Wolkenstein, L. & Plewnia, C. (2013). Amelioration of cognitive control in depression by transcranial direct current stimulation, *Biological Psychiatry*, *73*(7), 646-651.

- Wolkenstein, L., Rombold-Bruehl, F., Bingmann, T., Sommer, A., Kanske, P. & Plewnia, C. (2021). Challenging control over emotions in borderline personality disorder—A tDCS study. *Neuropsychologia*, 156. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2021.107850
- Wu, Y., Tseng, P., Chang, C., Pai, M., Hsu, K., Lin, C. & Juan, C. (2014). Modulating the interference effect on spatial working memory by applying transcranial direct current stimulation over the right dorsolateral prefrontal cortex, *Brain and Cognition*, 91, 87-94.
- Ye, C., Xu, Q., Liu, Q., Cong, F., Saariluoma, P., Ristaniemi, T. & Astikainen, P. (2018). The impact of visual working memory capacity on the filtering efficiency of emotional face distractors, *Biological Psychology*, 138, 63-72.